



Centre d'Estudis del Risc Tecnològic
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Assessorament científic per analitzar el comportament del fum en cas d'incendi a l'aparcament Gràcia II de SABA

D3. Anàlisi de resultats. Informe final.

Barcelona, 17 de desembre de 2019

CONTINGUT

1 Objectius de l'estudi.....	3
2 Software utilitzat	4
3 Dades de partida	5
3.1 Característiques de l'edifici	5
3.2 Característiques del sistema de ventilació	6
3.3 Característiques de l'incendi	7
3.4 Ubicació de l'incendi.....	10
3.5 Capacitat d'ocupació de l'aparcament	10
3.6 Característiques del règim de salubritat diària	11
3.7 Zones de detecció de CO	12
3.8 Domini computacional i mallat.....	12
3.9 Simulació del sistema de ventilació.....	16
4 Paràmetres a visualitzar	23
5 Resultats de l'escenari A (incendi al soterrani PS-4).....	25
5.1 Velocitat de l'aire i funcionament del sistema de ventilació	25
5.2 Difusió de fum 3D	29
5.3 Visibilitat	32
5.4 Temperatura.....	39
5.5 Concentració d'oxigen	46
5.6 Concentració de CO	51
5.7 Concentració de CO ₂	56
6 Resultats de l'escenari B (salubritat diària al soterrani PS-4).....	58
7 Conclusions.....	63
8 Bibliografia	64

1 Objectius de l'estudi

Aquest estudi té com a objectiu analitzar el comportament de la ventilació pel control del fum en cas que es produeixi un incendi a la planta PS-4 de l'aparcament SABA Gràcia II. Malgrat que la ventilació actual de l'aparcament no és un sistema per impulsos, es pretén valorar si es compleixen els objectius definits en la *Guia tècnica de disseny prestacional per a sistemes de control de fums i calor per impuls en aparcaments* (GTC.SP.001, V.2 2017). En aquest estudi s'analitzarà també el sistema de ventilació per a salubritat diària pel control de monòxid de carboni (CO) de l'aparcament.

Les tasques específiques a realitzar per a dur a terme l'estudi es poden resumir en els següents punts:

1. Anàlisi i processat de la informació proporcionada per Saba, per generar el model de l'aparcament.
2. Definició dels escenaris de simulació per tal d'identificar el comportament del sistema de ventilació existent:
 - a. Escenari A: Incendi a la planta soterrani PS-4
 - b. Escenari B: Salubritat diària a la planta soterrani PS-4
3. Definició de l'incendi de disseny a utilitzar, seguint les indicacions de les normatives nacionals i internacionals.
4. Simulació dels escenaris definits amb la descripció de tot el treball, anàlisi de resultats i conclusions del mateix.
5. Redacció d'un informe amb la descripció del disseny, anàlisi dels resultats i conclusions del mateix.

Aquest informe recull les condicions de partida, el disseny i els escenaris simulats així com els resultats i les conclusions.

2 Software utilitzat

En aquest estudi es durà a terme una simulació per a cadascun dels escenaris definits, escenaris A i B. Això es durà a terme amb el software *Fire Dynamics Simulator* (FDS). La geometria ha estat implementada utilitzant el software Pyrosim. Cal tenir en compte que aquest simulador resol numèricament un conjunt d'equacions que assegurin el compliment dels principis de conservació de matèria, energia i quantitat de moviment per a cada instant de temps de la simulació. Aquests càlculs es realitzen en un espai tridimensional que actua com a volum de control sobre la geometria modelada.

Totes les simulacions es duren a terme amb una màquina de càlcul Intel Xeon E5-2699 v4 @ 2.20GH de 44 processadors lògics i 256GB de RAM. D'aquesta manera, la geometria implementada i més concretament el mallat es dissenya per optimitzar al 100% els rendiment computacional que ofereixen els 44 processadors de la màquina de càlcul. Per trobar el disseny òptim del mallat s'han hagut de realitzar prèviament diverses simulacions fins a trobar el que s'ha considerat el més adequat per aquest estudi, de manera que hi hagi un equilibri entre resolució i temps de simulació.

3 Dades de partida

3.1 Característiques de l'edifici

L'aparcament Gràcia II de SABA disposa de 4 nivells soterranis. Com que totes les plantes són pràcticament iguals, l'estudi es centra en un incendi a la planta soterrani PS-4 i la possible afectació (si és el cas) a la planta PS-3. Cadascuna de les plantes estan detallades segons la següent descripció:

- Les quatre plantes soterrani de l'aparcament estan comunicades entre si mitjançant rampes interiors de direcció única. El soterrani PS-1 és la única que comunica amb l'exterior.
- Les bigues principals són de formigó armat i una llosa de 20cm de canto.
- L'aparcament té tres cambres amb ventiladors d'impulsió.
- El desenfumatge es produeix per ventilació natural
- Disposa d'una instal·lació de detecció d'incendis mitjançant detectors termovelocimètrics segons la norma UNE 23007-6, homologats per AENOR.
- S'ha previst 1 detector de temperatura per a cada 200 m² de superfície de l'aparcament
- Disposa d'una instal·lació de detecció de CO mitjançant detectors de gas que s'activen quan el nivell de CO assoleix 50 ppm.
- S'ha previst 1 detector de CO per cada 200 m² de superfície de l'aparcament. En el cas del soterrani PS-4 hi ha instal·lats 26 detectors de CO.
- El soterrani PS-4 disposa d'una instal·lació de ruixadors automàtics sota forjat.

Taula 1. Característiques de les plantes del pàrquing

Soterrani	Superfície total (m ²)	Alçada total (m)	Alçada entre la biga i el terra (m)
Planta PS-1	6.834,29	3,10	2,17
Planta PS-2	6.349,72	2,74	2,16
Planta PS-3	6.349,72	2,78	2, 20
Planta PS-4	6.349,72	2,79	2, 17

La Figura 1 mostra el plànol de la planta soterrani S-4.

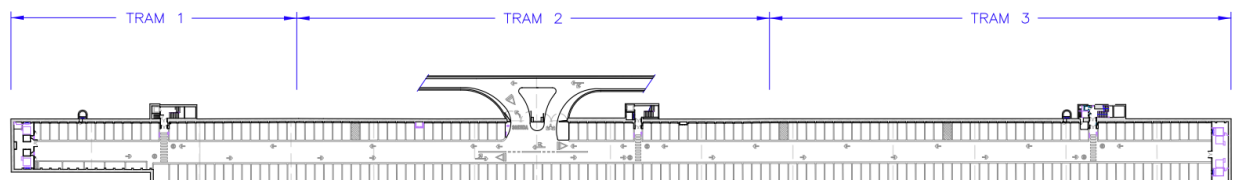


Figura 1 - Croquis de situació de la planta soterrani PS-4.

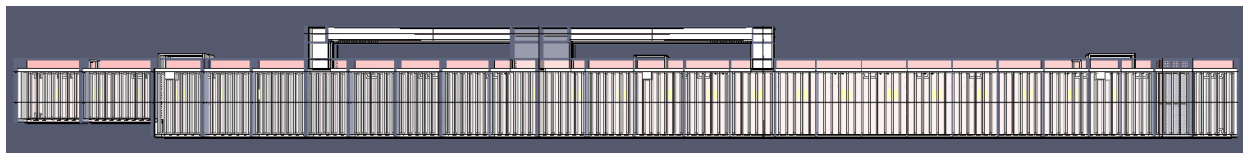


Figura 2 - Geometria de la planta PS-4 dissenyada amb Pyrosim.

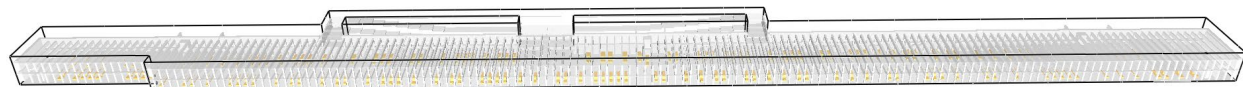


Figura 3 - Vista general de la geometria en 3D de les plantes PS-3 i PS-4 simulades amb FDS.

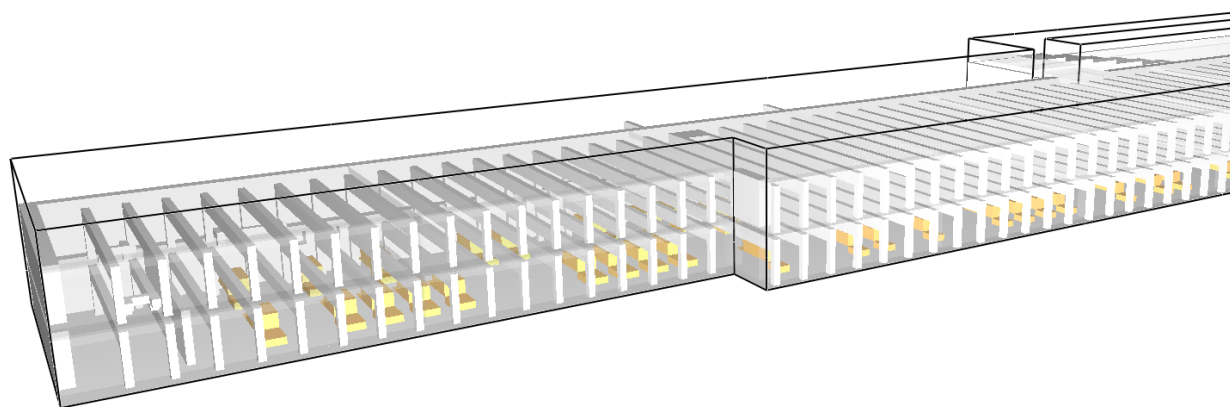


Figura 4 - Vista de detall de la geometria en 3D de les plantes PS-3 i PS-4 simulades amb FDS.

3.2 Característiques del sistema de ventilació

La instal·lació està formada per 3 cambres amb ventiladors d'impulsió. Al PS-4 hi ha instal·lats dos ventiladors de la marca Chicago Rosa modelo 40.D. Un de 22KW a la zona mar i un de 37KW a la de muntanya. Mitjançant conductes i dues reixes per planta i extrem impulsen aire a totes les plantes pels extrems. La resta de reixes que hi ha a cada planta a la paret costat *Girona* comuniquen amb uns conductes d'extracció sense ventilador que comuniquen amb pous de ventilació amb reixes al terra del carrer. Son sortides per sobrepressió. Més detalls a tenir en compte són els següents:

- S'encenen dos dels ventiladors, manualment, abans de les hores punta un per a cada cambra. Encara que en cas de detecció d'alta concentració de CO els ventiladors s'encendran automàticament en la planta on s'ha produït la detecció.
- Les reixes de ventilació accionades mitjançant motor elèctric estan tancades en les plantes PS-2, PS-3 i PS-4 i obertes a la planta PS-1. D'aquesta manera la totalitat de l'aire serà abocada a la planta PS-1 que comunica amb l'exterior.

- Grups de ventilació:
 - PS-2:**
 - Zona central, costat Girona: Dos (2) motors de ventilació de 22 kW cada un.
30 CV, 45,5 A, 970 rpm
30 CV, 45,5 A, 970 rpm
 - PS-4:**
 - Zona muntanya, a l'extrem: Dos (2) motors de ventilació de 37 kW cada un.
50 CV, 72 A, 980 rpm
50 CV, 76,3 A, 960 rpm
 - Zona mar, a l'extrem: Dos (2) motors de ventilació de 22 kW cada un.
30 CV, 45,5 A, 970 rpm
30 CV, 45,5 A, 970 rpm

Funcionament del sistema de ventilació:

- L'aire és aspirat directament des de l'exterior mitjançant reixes de ventilació destinades a aquesta única finalitat, situades a nivell de terra a les tercianes del Passeig de Gràcia, fins a arribar a la sala de ventiladors, els quals l'impulsen a través dels conductes i reixes d'impulsió fins a les plantes.
- Les cambres de ventilació situades a la PS-4 impulsen aire a totes les plantes a través de conductes i reixes d'impulsió situades als extrems de cada planta. De la mateixa manera ho fa la cambra de ventilació situada a la PS-2 a través de conductes i reixes de ventilació situades a la zona central de cada planta.
- L'aire impulsat a cada planta escombra la seva superfície i surt a l'exterior a través de les rampes d'accés de vehicles i per les reixes d'extracció.

3.3 Característiques de l'incendi

S'ha portat a terme una anàlisi bibliogràfica per cercar dades experimentals d'incendis en aparcaments així com corbes d'incendi de referència. La majoria d'estudis trobats, tot i que siguin recents, utilitzen corbes d'incendi basades en dades obtingudes en la dècada dels 90. Les dades experimentals més recents les trobem al 2007 i els vehicles utilitzats van ser fabricats a principis del 2000.

Tot i que existeixen un gran nombre d'estudis de simulació sobre incendis en aparcaments, tots ells es basen en les mateixes corbes de referència. No ha estat possible trobar dades experimentals més recents que les obtingudes pel Building Research Establishment (BRE) i publicades el 2010. Això no vol dir que no s'hagin realitzat més estudis, sinó que simplement no han estat publicats.

Així doncs, es proposa com a referència una corba d'incendi amb sistema d'extinció automàtic, basada en els resultats d'un experiment real que va duu a terme pel BRE (BRE, 2010). L'experiment es va realitzar el 20 de setembre de 2007 a les instal·lacions de BRE a Garston, Liverpool. En aquest experiment van disposar de tres cotxes (Renault Grand Espace del 2000, Seat Ibiza del 2002 y Land Rover Freelander del 2002) situats un al costat de l'altre. L'incendi va ser iniciat amb el Renault Grand Espace, situat en un dels

extrems. El sistema d'extinció automàtic va ser dissenyat segons la BS EN 12845:2004 amb classificació OH2 5mm/min i 12m² per ruixador (un total de 6 ruixadors).

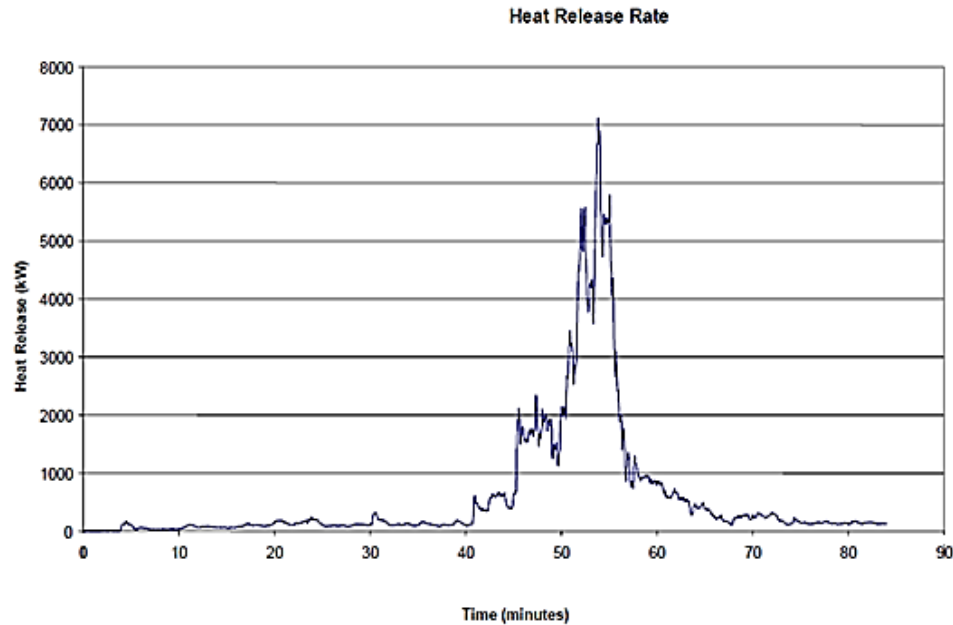


Figura 5 - Corba d'incendi amb ruixadors obtinguda a l'experiment del BRE (BRE, 2010)

Com a resultat, l'incendi no es va propagar als cotxes pròxims degut a l'efecte dels ruixadors. El període d'ignició del cotxe comprèn els primers 40 minuts (Figura 5). S'ha prescindit d'aquest període ja que els escenaris han de partir de la suposició que la ignició ja ha tingut lloc prèviament. En conseqüència, i per reduir temps de simulació, la corba simplificada que es proposa és la següent (Figura 6):

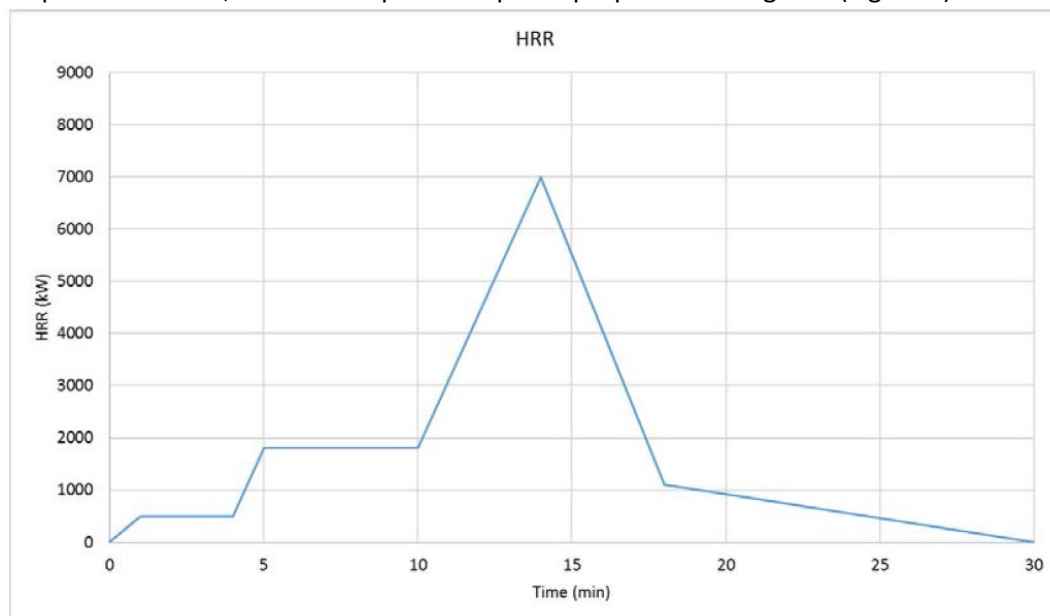


Figura 6 - Corba d'incendi amb ruixadors simplificada

L'incendi es desenvolupa al llarg dels 30 minuts, arribant un pic de 7 MW al voltant dels 14 minuts després de l'inici de l'incendi. Les dades introduïdes en FDS que fan referència a l'incendi es detallen a continuació:

- Àrea d'incendi equivalent a una plaça d'aparcament.
- Potència de l'incendi per unitat de superfície (HRRPUA) de 520,83 kW/m² amb la variació en funció del temps que es detalla a la Taula 2.

Taula 2. Fracció del valor HRRPUA en funció del temps

Temps (s)	Fracció (%)
0	0,00
60	7,14
240	7,14
300	25,71
600	25,71
840	100
1080	15,71
1800	0,00

- Posició de l'incendi a nivell del terra.
- Combustible utilitzat en FDS: Polipropilè (PP). S'ha escollit aquest combustible ja que es tracta d'un component majoritari en la composició d'un cotxe.
- A més de CO₂ y H₂O, s'ha considerat que la reacció de combustió produeix també CO i sutge. La quantitat que es forma d'aquests productes es detalla a la Taula 3. Aquests valors han sigut extrets de la guia C/VM2. Verification Method: Framework for fire safety design [Ministry of business, Innovation & Employment, 2013] i són també els recomanats per la guia tècnica GTC.SP.001.

Taula 3. Quantitat de CO i sutge generat, en fracció massica (kg/100 kgfuel)

Producte	Fracció massica (%)
CO	4,00
Sutge	7,00

Cal dir que aquesta corba és més aviat poc conservadora ja que en general les corbes utilitzades en els estudis de simulació presenten durades més llargues de fins a 1 h, amb quantitats totals d'energia alliberada de pràcticament el doble que aquesta. Nogensmenys, com que l'objectiu aquí és veure com funciona el sistema de ventilació actual, especialment durant la fase d'evacuació, aquesta corba és adequada ja que té un creixement més ràpid que les altres. Al ser la durada de 30 minuts això permet reduir el temps de simulació.

3.4 Ubicació de l'incendi

Per localitzar fàcilment la ubicació de l'incendi s'ha dividit la planta del soterrani PS-4 en tres trams i l'incendi s'ha situat en el tram 3 (costat mar), a la posició de la plaça 4008 y s'ha representat amb un quadrat vermell a la Figura 7.

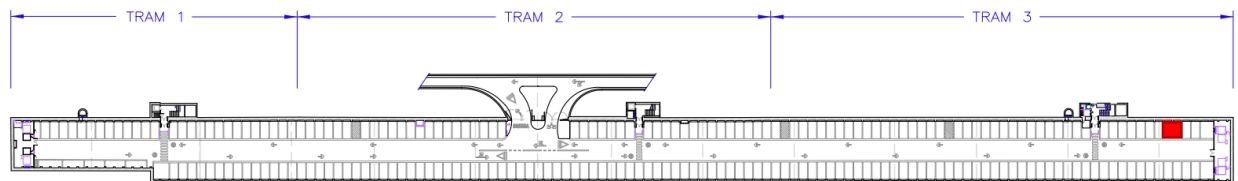


Figura 7 - Ubicació de l'incendi en el tram 3 del soterrani PS-4

S'ha situat la ignició al final del tram 3 perquè s'ha considerat que era conservador ja que es troba allunyat de la rampa, que permet anar extraient fum. Tot i així, s'han representat conjuntament les dues plantes per veure també l'afectació del fum en el soterrani PS-3.

3.5 Capacitat d'ocupació de l'aparcament

Segons el plànol de la planta PS-4 facilitat per SABA, aquesta planta té una capacitat d'ocupació de cotxes de 235 places distribuïdes per trams de la següent forma:

- Tram 1: 47 places
- Tram 2: 95 places
- Tram 3: 93 places

Atès que la presència de cotxes a l'aparcament durant el desenvolupament d'un incendi pot suposar una certa dificultat en el moviment de l'aire i fum, s'ha cregut convenient incloure'ls també en la simulació. Així, en el disseny geomètric s'han col·locat aleatòriament cotxes (obstruccions en groc a la Figura 8 i Figura 9).

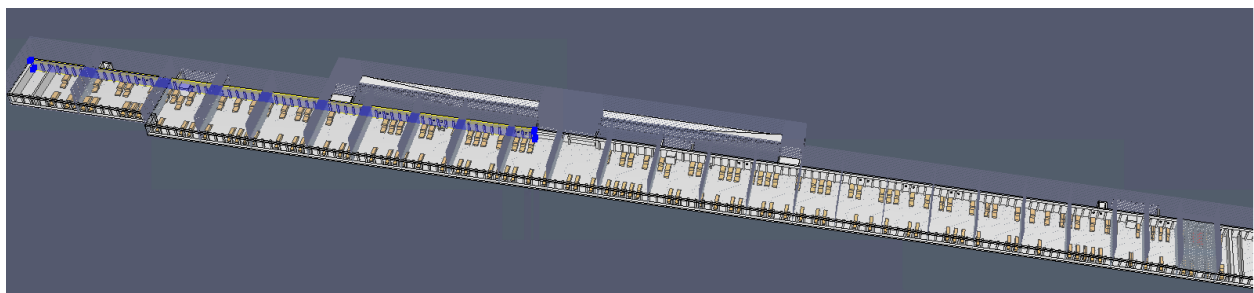


Figura 8 - Ubicació dels cotxes aleatòriament en la planta PS-4 de l'aparcament (vista completa)

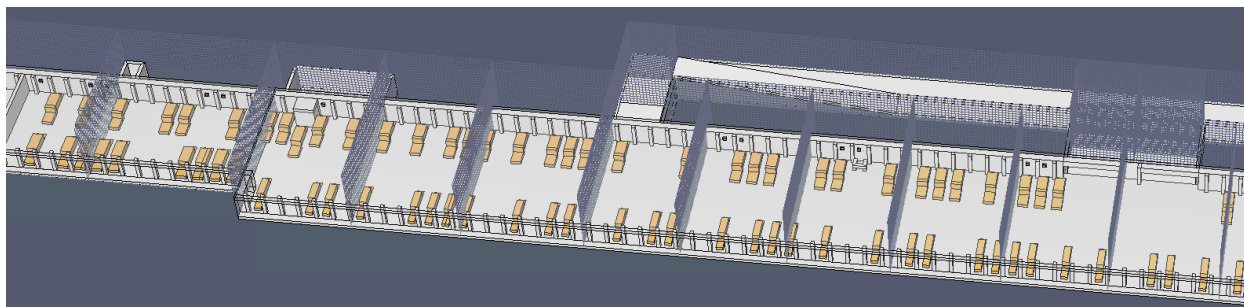


Figura 9 - Exemple de la ubicació de cotxes del tram 1 de la planta PS-4

En total s'han creat 163 cotxes que s'han repartit aleatòriament, això representa una ocupació del 70% de les places del soterrani PS-4.

3.6 Característiques del règim de salubritat diària

Per a la determinació de la concentració de CO, tant en els escenaris d'incendi com en els de salubritat diària, cal tenir en compte que, en tot moment a l'interior de l'aparcament hi haurà una concentració basal de CO, que sempre serà més gran que la de l'aire exterior.

En les dades proporcionades per SABA, es fa un càlcul de la concentració basal esperada de CO a partir de balanços de matèria que porta a un valor mitjà aproximat de 3,8 ppm. Alhora SABA també disposa d'una sèrie de mesures reals efectuades en diversos punts de cadascuna de les plantes que proporciona un valor mitjà per a tot l'aparcament de 4,3 ppm (amb valors mitjans per planta que oscil·len entre 2,3 i 6 ppm) i mostra com a valor màxim absolut obtingut 8,3 ppm. Es pot considerar per tant que probablement hi hagi un valor mitjà basal de CO de 4 ppm en tot l'aparcament, tot i així, com que és un valor petit, en les simulacions de l'escenari d'incendi (Escenari A) no s'ha tingut en compte.

D'altra banda en les situacions en què s'activa algun sensor de CO per assolir el llindar de 50 ppm, és difícil pensar que la resta de la planta tindrà la concentració basal, ja que això passarà quan hi hagi un elevat tràfic de vehicles. Alguns autors (Chaloulakou, Duci & Spyrellis, 2002) suggereixen concentracions mitjanes d'1h en els pics de sortida de vehicles de 24-34 ppm. Considerant això, és raonable afirmar que en les situacions d'activació de la ventilació per nivells de CO de 50 ppm, la concentració mitjana de CO a la resta de la planta de l'aparcament pot estar al voltant dels 20 ppm. Cal esmentar que això succeirà quan hi hagi un volum de tràfic important. En altres supòsits, per exemple, que un vehicle pugui estar molta estona en marxa a prop d'un sensor i provoqués que aquest s'activi, però no hi hagi realment molt de moviment, la concentració mitjana de la resta de l'aparcament llavors seria l'equivalent a la concentració basal de 4 ppm. Tot i així, s'ha optat per el cas conservador i en les simulacions de l'escenari de salubritat (Escenari B) s'ha considerat una zona de 200 m² amb una concentració de 50 ppm i tota la resta del soterrani PS-4 s'ha considerat que té una concentració de 20 ppm (Figura 10). El soterrani PS-3 s'ha deixat sense CO.

3.7 Zones de detecció de CO

Els detectors de CO s'activen quan el nivell de CO arriba als 50 ppm. Els sensors són del tipus analògic direccional, fabricats segons la Norma UNE 2300-84 i homologats. S'ha previst un detector de CO per cada 200 m² de superfície de l'aparcament. L'activació d'algun dels sensors de la planta fa que es posi en funcionament el sistema de ventilació forçada. El sistema s'atura quan es desactiva el senyal de CO, concretament quan la concentració baixa a 49 ppm, el sistema funciona durant 5 minuts més i després s'atura.

Els detectors de CO estan repartits en 3 trams diferents per cada planta, al soterrani PS-4.

- TRAM 1: 6 detectors de CO
- TRAM 2: 11 detectors de CO
- TRAM 3: 9 detectors de CO

La Figura 10 mostra la posició de la zona que es troba a 50 ppm, la posició del sensor de CO corresponent i la zona que es troba a 20 ppm.

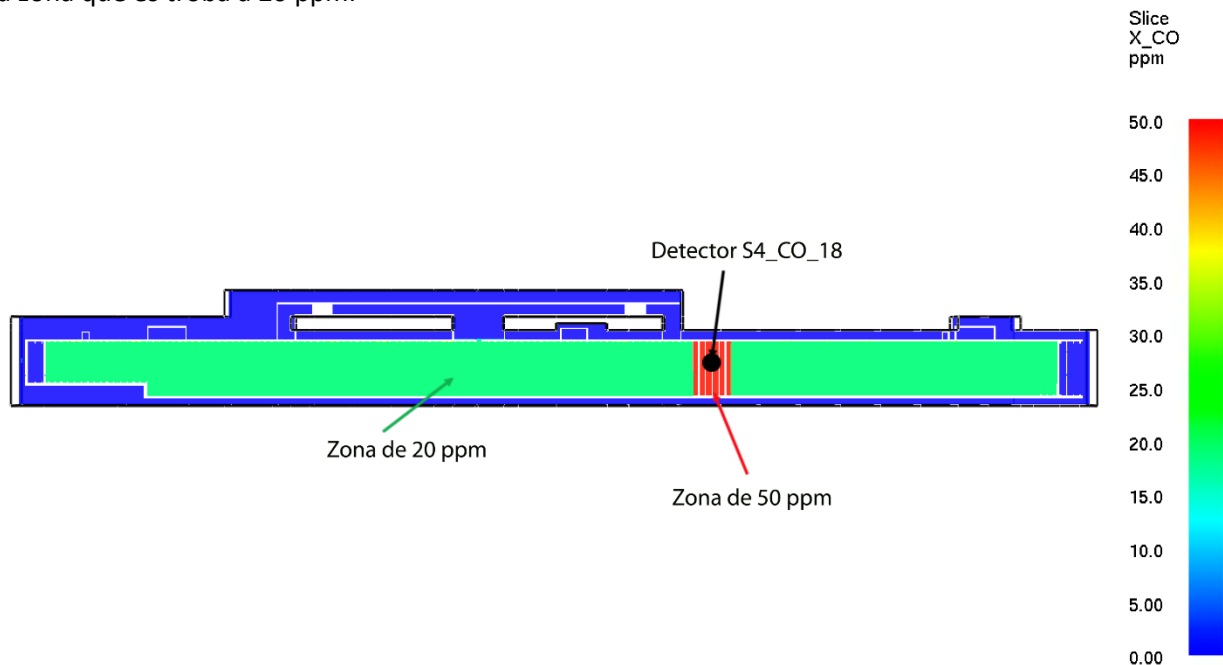


Figura 10 - Zona de 50 ppm considerada per l'escenari de salubritat en el soterrani PS-4

3.8 Domini computacional i mallat

El domini computacional de l'aparcament s'ha centrat en les dues plantes PS-4 i PS-3. Donades les característiques de l'aparcament com també l'estudi d'afectació de l'incendi en la planta -3 també s'ha fet un èmfasi especial en la rampa. A la Figura 11 es pot veure en vermell quin és el domini computacional

del model. Elements com escales d'emergència, ascensors i portes d'accés de vianants es consideren tancades al pas de l'aire.

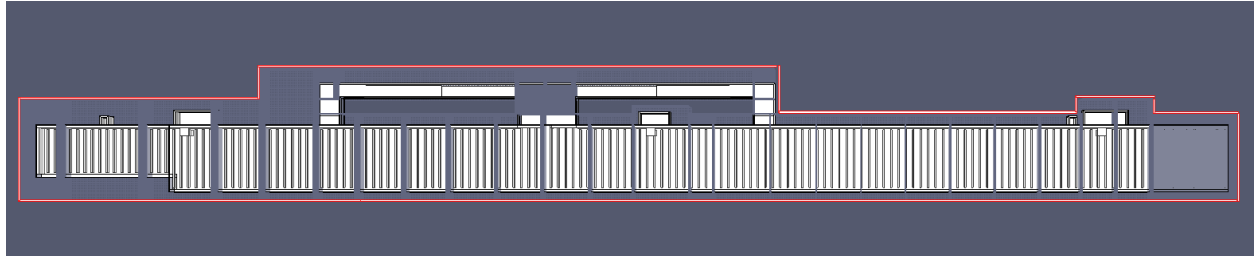


Figura 11 - Domini computacional del model pel soterrani PS-4 i PS-3

El model resultant utilitzat en el Pyrosim es mostra a la Figura 12.

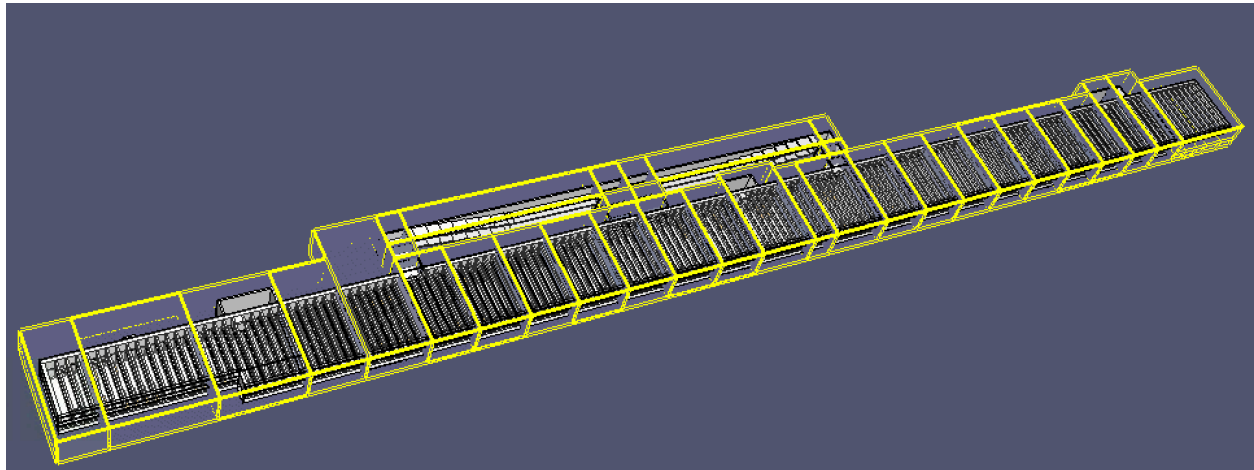


Figura 12 - Model 3D del soterrani PS-4 i PS-3 construït amb Pyrosim

Pel què fa al mallat, inicialment es fa una estimació de la mida de la cel·la a utilitzar tenint en compte el nivell de resolució de la simulació. Per aquest motiu és necessari calcular el diàmetre característic de l'incendi amb l'equació (1):

$$D^* = \left(\frac{Q}{1100} \right)^{\frac{2}{5}} \quad (1)$$

on:

D^* Diàmetre característic del foc, m
 Q Potència calorífica (HRR), kW

Es pren com a potència calorífica el valor màxim, és a dir 7000 kW per assegurar que el nivell de resolució desitjat compren el pic de l'incendi. Com a resultat s'obté un diàmetre característic del foc de 2,1 metres.

Per quantificar el nivell de resolució d'una simulació d'aquest tipus s'utilitza el quocient del diàmetre característic del foc (D^*) entre la mida de la cel·la (dx). Valors típics d'aquest quocient són 4 (nivell de resolució baix, cel·la gruixuda), 10 (nivell de resolució moderat, cel·la moderada) i 16 (nivell de resolució alt, cel·la fina). Amb aquesta informació es calculen les possibilitats de la mida de cel·la a utilitzar (veure la Taula 4).

Taula 4. Mida de cel·la en funció del nivell de resolució de la simulació

Nivell de resolució	D^*/dx	Mida de cel·la (m)
Baix	4	0,52
Moderat	10	0,21
Alt	16	0,13

Tenint en compte les dimensions de l'escenari a simular, s'han realitzat prèviament diferents proves de simulació per veure quin tipus de mallat és el més adequat. Tenint en compte el cost computacional, depenent del nombre de processadors que tenim (recordem que són 44 cores), s'ha cregut convenient optar per una mida de cel·la de 40 cm en totes les zones les quals no requereixin de molta resolució. D'aquesta manera, es prefereix optimitzar els recursos en les zones de gran interès i així no treballar amb excessives cel·les reduint el temps de càlcul necessari.

La zona on està ubicat l'incendi, i zones properes al foc així com algunes parts de la rampa s'ha considerat convenient emprar una mida de cel·la més fina per obtenir dades més significatives.

Així doncs, el mallat del model s'ha distribuït de la següent manera:

- Cel·les cúbiques de 40 cm per la resta de l'aparcament. S'obtenen un total de 27 malles de 40cm (veure la Figura 13).
- Cel·les cúbiques de 20 cm per la zona on s'ha ubicat l'incendi i algunes parts de la rampa. S'obtenen en total 17 malles de 20cm (veure la Figura 14).

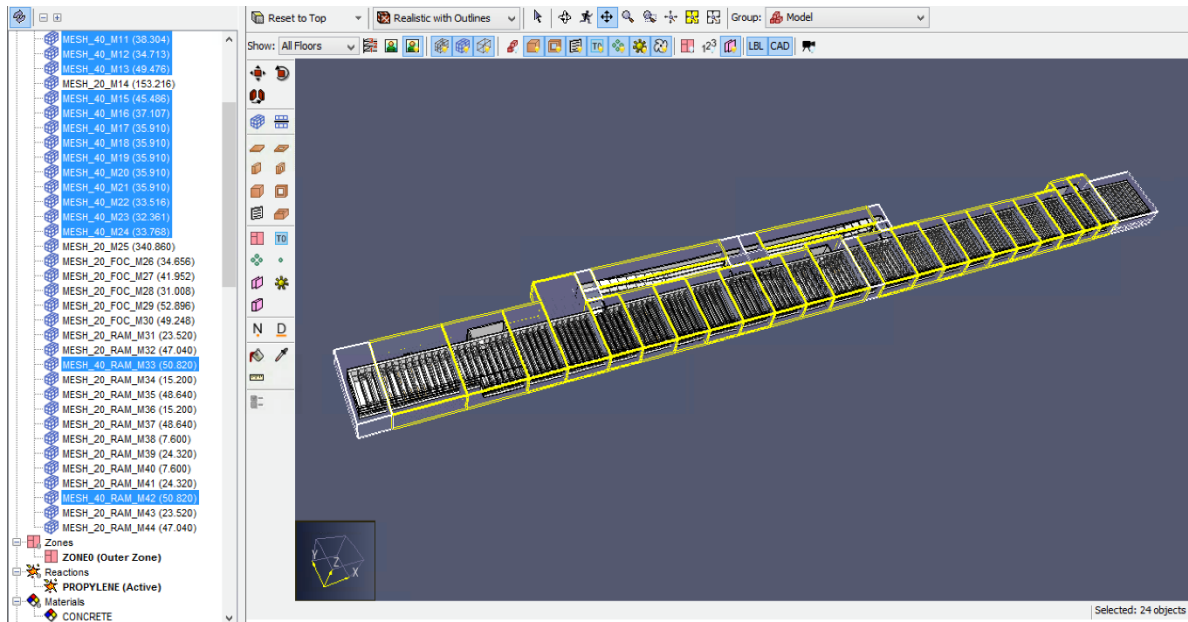


Figura 13 - Mallatge corresponent a les 28 malles de 40 cm de l'aparcament (representat en groc)

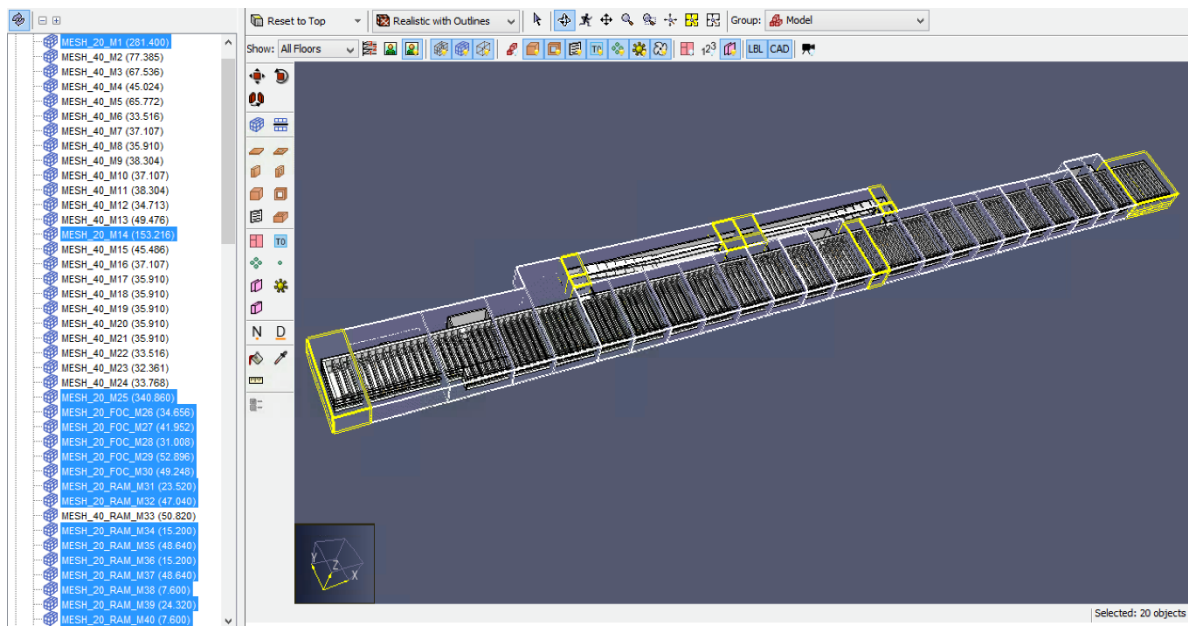


Figura 14 - Mallatge corresponent a les 16 malles de 20 cm de l'aparcament (representat en groc)

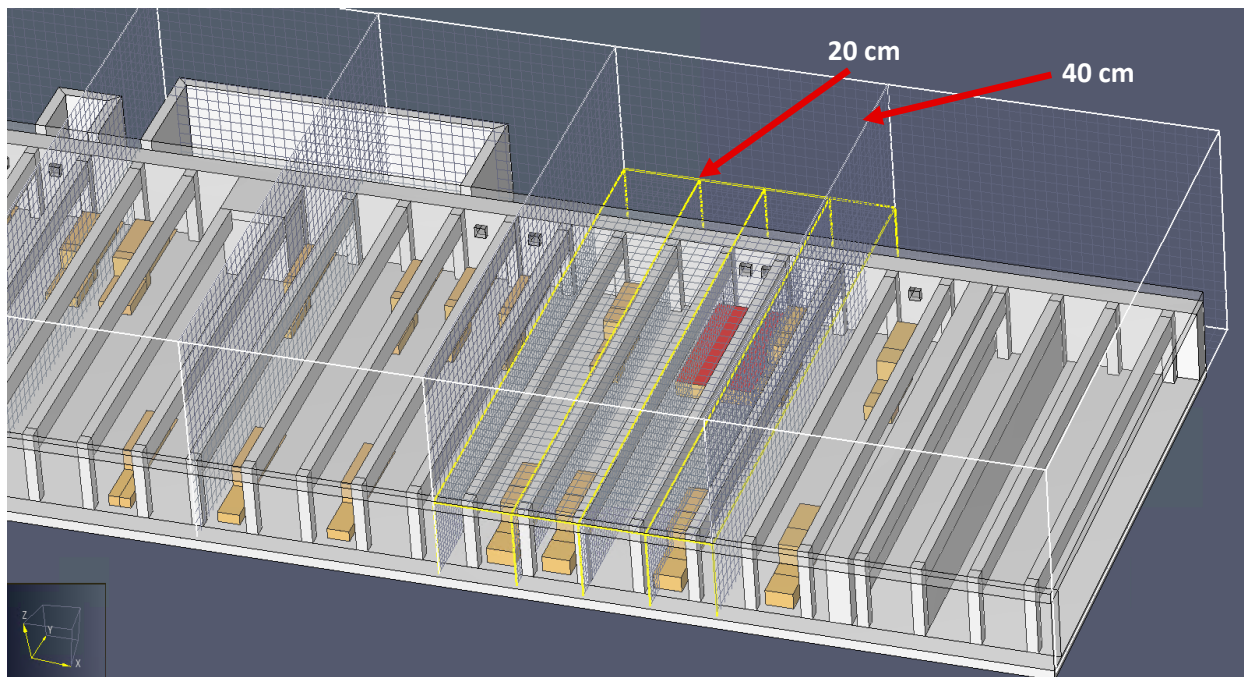


Figura 15 - Exemple del mallatge de 20cm corresponent a la zona on està ubicat l'incendi (representat en groc)

Cal remarcar que les malles corresponents a l'incendi s'han dividit en dues parts: en el soterrani PS-4 s'ha construït una malla de 20 cm, i en el soterrani PS-3 de 40 cm (veure Figura 15). D'aquesta manera, la simulació té un cost computacional menor ja que la part important per analitzar és la zona de l'incendi que està situat en la planta del soterrani PS-4.

Així doncs, es disposa de **2.341.458 cel·les** repartides en 44 malles, de les quals 1.300.602 cel·les són de 40 cm i 1.040.856 cel·les són de 20cm.

3.9 Simulació del sistema de ventilació

Segons la informació facilitada per SABA, es van prendre mesures de les reixes i es va determinar la localització exacta de cadascuna d'elles. Aquesta informació la van facilitar a través de plànols escanejats amb les indicacions corresponents a les plantes PS-3 i PS-4.

L'aportació d'aire es fa a través de reixes verticals. A la Taula 5 es poden veure els detalls de mides, cabals i velocitats de cadascuna de les reixes (vegeu també la Figura 16).

Taula 5. Descripció detallada de les reixes verticals (aportació d'aire)

Planta	Zona	Nomenclatura Reixes	Dimensions (cm)	Cabal (m ³ /s)	Velocitat (m/s)
PS-3	Zona Muntanya	Vent_S3_I01	28x68	1,43	11,41
		Vent_S3_I02	28x68	1,90	15,15
		Vent_S3_I03	58x98	2,84	5,56
	Zona Centre	Vent_S3_I04	60x106	3,12	5,44
	Zona Mar	Vent_S3_I05	58x128	4,15	8,48

		Vent_S3_I06	58x128	4,15	8,48
PS-4	Zona Muntanya	Vent_S4_I01	28x68	1,40	11,17
		Vent_S4_I02	28x68	1,51	12,03
	Zona Centre	Vent_S4_I03	60x106	2,27	3,96
	Zona Mar	Vent_S4_I04	58x98	3,89	10,37
		Vent_S4_I05	58x98	3,89	10,37

L'extracció d'aire es fa a través de reixes horitzontals. L'aire és expulsat cap a l'exterior de forma natural per la sobrepressió causada per l'aire d'impulsió. A la Taula 6 es poden veure les dimensions de les reixes d'extracció situades als soterranis PS-3 i PS-4.

Taula 6. Descripció detallada de les reixes horitzontals (extracció d'aire)

Planta	Zona	Núm. reixes	Nomenclatura reixes	Dimensions (cm)
PS-3	Zona Muntanya	6	Vent_S3_E1...Vent_S3_E6	68x178
	Zona Centre	8	Vent_S3_E7...Vent_S3_E15	68x178
	Zona Mar	12	Vent_S3_E16...Vent_S3_E28	68x178
PS-4	Zona Muntanya	6	Vent_S4_E1...Vent_S4_E6	55x190 (al sostre)
	Zona Centre	8	Vent_S4_E7...Vent_S4_E15	55x190 (al sostre)
	Zona Mar	11	Vent_S4_E16...Vent_S4_E27	55x190 (al sostre)

Per definir el sistema de ventilació al model, s'ha hagut d'adaptar la mida de les reixes en el model tenint en compte el mallat utilitzat. Per fer-ho s'ha agafat com a referència les mides de les reixes reals tal i com es detallen en les taules anteriors (Taula 5 i Taula 6) i s'ha intentat ajustar perquè les àrees siguin el màxim semblants possible (Taula 7 i Taula 8). Pyrosim ofereix diferents maneres de definir la ventilació: VENT o HOLE. En aquest cas, s'ha triat utilitzar un VENT per a les reixes horitzontals (extracció), i en el cas d'impulsió d'aire s'ha complementat el VENT amb un sistema *Heating, Ventilating and Air Conditioning* (HVAC). L'HVAC permet definir el cabal (m^3/s) corresponent a cada reixa d'impulsió. La Figura 15 i la Figura 16 mostren la ubicació de les reixes d'impulsió (verd) i extracció (blau) a les plantes PS-3 i PS-4 respectivament.

Taula 7. Definició de l'àrea de les reixes al model geomètric de la planta PS-3 (Impulsió i extracció)

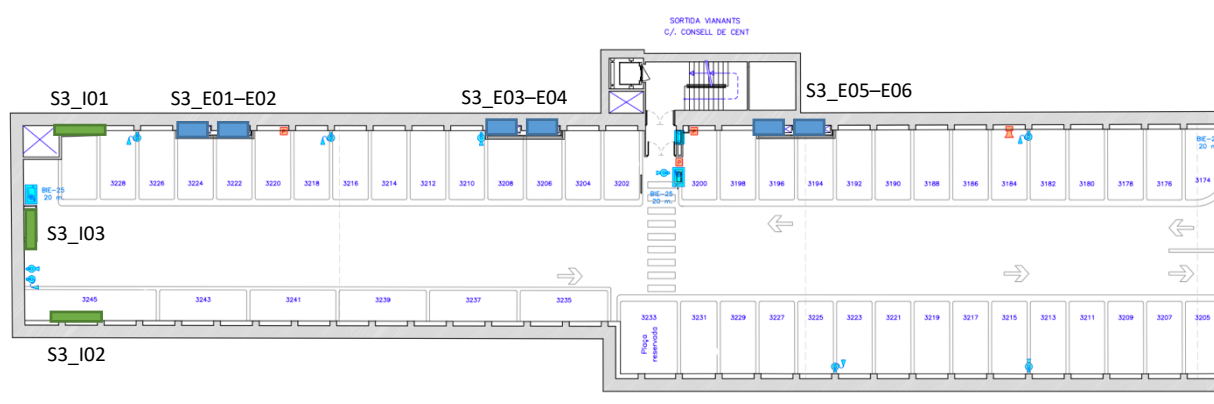
Planta	Tipus	Reixes	Àrea real	Àrea geometria	Mallat
PS-3	Impulsió	VENT_S3_I01	$(0,28 \times 0,68) = 0,1904$	$(0,2 \times 0,8) = 0,16$	0,2
		VENT_S3_I02	$(0,28 \times 0,68) = 0,1904$	$(0,2 \times 0,8) = 0,16$	0,2
		VENT_S3_I03	$(0,58 \times 0,98) = 0,5684$	$(0,4 \times 1,4) = 0,56$	0,2
		VENT_S3_I04	$(0,6 \times 1,06) = 0,636$	$(0,8 \times 0,8) = 0,64$	0,2
		VENT_S3_I05	$(0,58 \times 1,28) = 0,7424$	$(0,6 \times 1,2) = 0,72$	0,2
		VENT_S3_I06	$(0,58 \times 1,28) = 0,7424$	$(0,6 \times 1,2) = 0,72$	0,2
	Extracció	VENT_S3_E01-25	$(0,68 \times 1,78) = 1,21$	$(0,8 \times 1,6) = 1,28$	0,4

Taula 8. Definició de l'àrea de les reixes al model geomètric de la planta PS-4 (Impulsió i extracció)

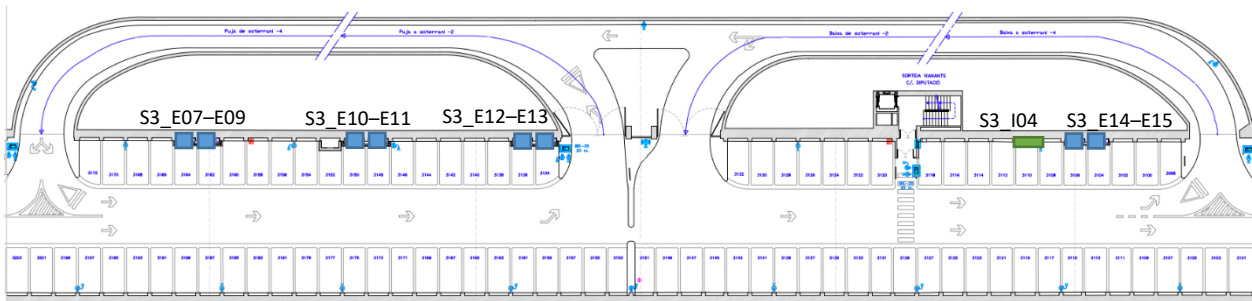
Planta	Tipus	Reixes	Àrea real	Àrea geometria	Mallat
PS-4	Impulsió	VENT_S4_I01	$(0,28 \times 0,68) = 0,1904$	$(0,2 \times 0,8) = 0,16$	0,2
		VENT_S4_I02	$(0,28 \times 0,68) = 0,1904$	$(0,2 \times 0,8) = 0,16$	0,2
		VENT_S4_I03	$(0,6 \times 1,06) = 0,636$	$(0,8 \times 0,8) = 0,64$	0,2
		VENT_S4_I04	$(0,58 \times 1,28) = 0,7424$	$(0,6 \times 1,2) = 0,72$	0,2
		VENT_S4_I05	$(0,58 \times 1,28) = 0,7424$	$(0,6 \times 1,2) = 0,72$	0,2
	Extracció	VENT_S4_E01-25	$(0,55 \times 1,90) = 1,045$	$(0,8 \times 1,2) = 0,96$	0,4

Tram 1

■ Reixes d'impulsió ■ Reixes d'extracció



Tram 2



Tram 3

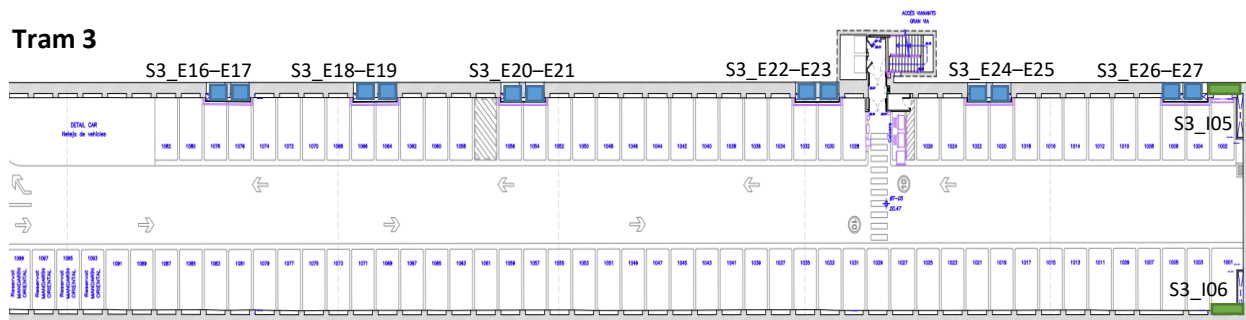
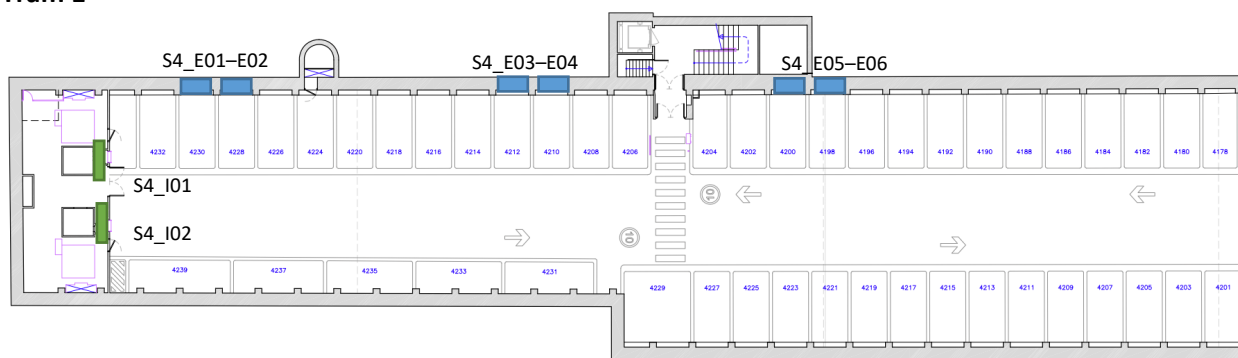


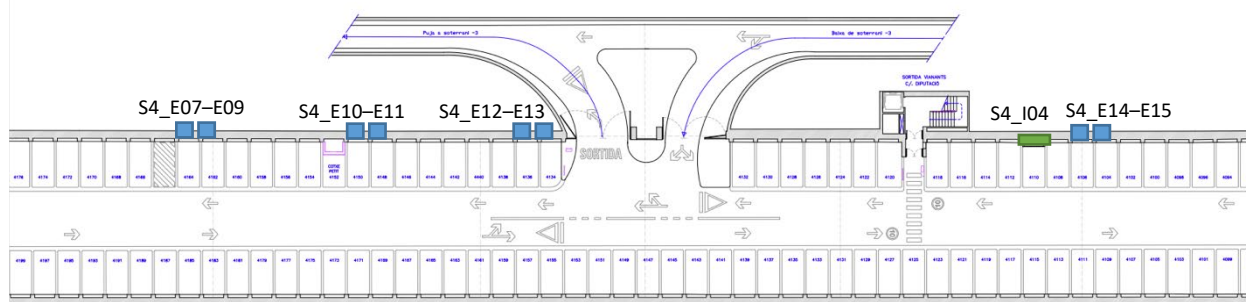
Figura 15 - Ubicació de les reixes d'impulsió i extracció en el plànol del soterrani S-3

■ Reixes d'impulsió ■ Reixes d'extracció

Tram 1



Tram 2



Tram 3

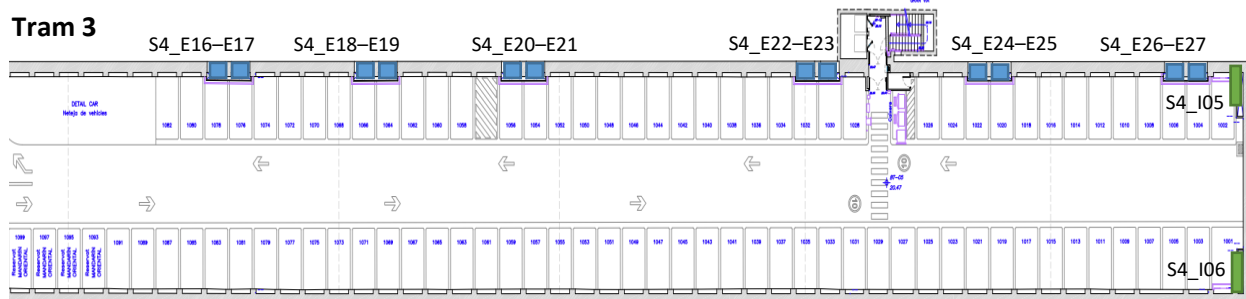


Figura 16 - Ubicació de les reixes d'impulsió i extracció en el plànol del soterrani S-4

A continuació es mostra un exemple de la geometria que s'ha dissenyat amb Pyrosim tant de les reixes d'impulsió com de les d'extracció.

3.9.1 Geometria de les reixes d'extracció d'aire

Segons l'àrea equivalent calculada anteriorment (Taula 7 i Taula 8), s'han dissenyat els VENTS (reixes) amb les mides corresponents. Amb la informació de partida sabem que la sortida de fum, per sobrepressió, surt per les reixes horitzontals que amb conductes comuniquen amb les de la planta PS-3, els quals alhora comuniquen amb els de la planta PS-2. Per dissenyar això amb Pyrosim, cada un dels VENTS se'ls hi assigna un node principal i un node intern que comunica amb el VENT de la planta PS-3 mitjançant un conducte. Aquest conducte és on circularà el fum que el seu recorregut finalitzarà fins arribar a un últim node situat a un VENT que s'ha creat al sostre del PS-3. D'aquesta manera simulem que el fum surt a l'exterior. Un exemple d'aquesta geometria es pot observar en la Figura 17.

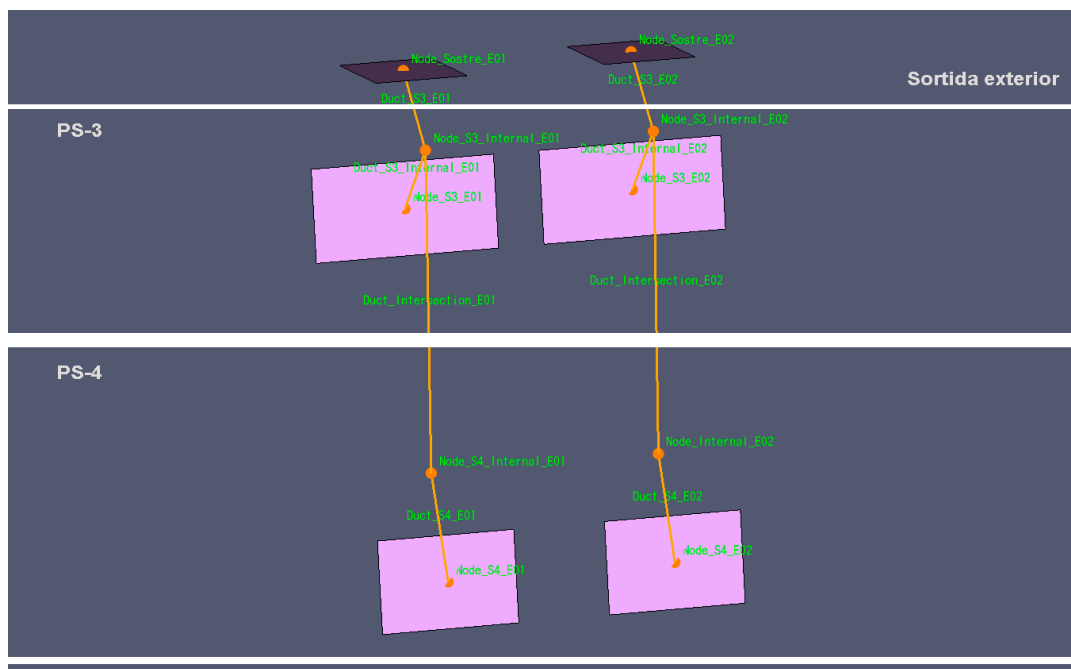


Figura 17 - Exemple de geometria dels VENT creada amb Pyrosim per representar reixes horitzontals (extracció d'aire)

Per tant s'ha dissenyat aquesta estructura per a totes les reixes d'extracció d'aire per sobrepressió. A la Figura 18 es pot veure un model 3D de les dues plantes PS-3 i PS-4 del pàrquing i el sistema de ventilació que s'ha creat per a cada reixa.

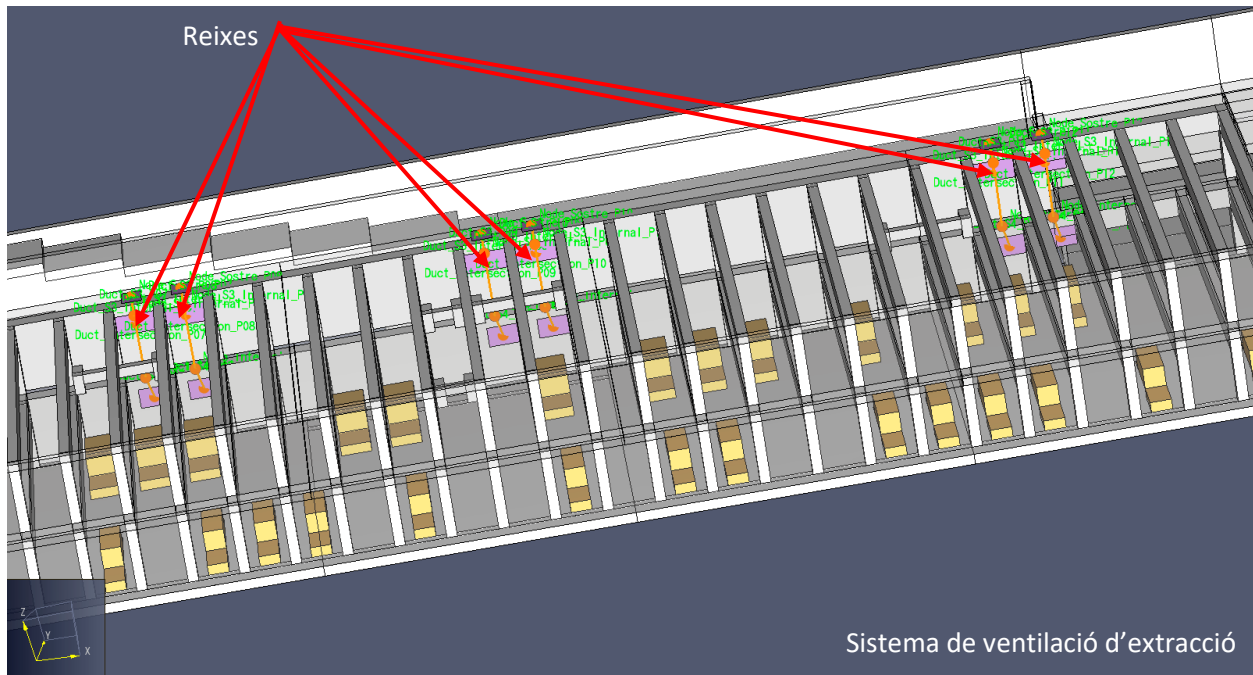


Figura 18 - Representació 3D de la geometria dissenyada amb Pyrosim del sistema de ventilació d'extracció d'aire.

3.9.2 Geometria de les reixes d'impulsió d'aire

El disseny de les reixes d'impulsió d'aire s'han fet també amb VENT. La diferència amb les d'extracció ve donada perquè en aquest cas li afegim un HVAC específic per assignar-li el cabal d'aire corresponent detallat a la Taula 5.

A la Figura 19 es mostra un exemple d'una reixa vertical d'impulsió d'aire, en aquest cas corresponent a la planta PS-3 zona mar. El VENT es pot veure de color blau i es veu clarament reflectit el que està situat dins de la planta per proporcionar l'aire mitjançant l'HVAC.

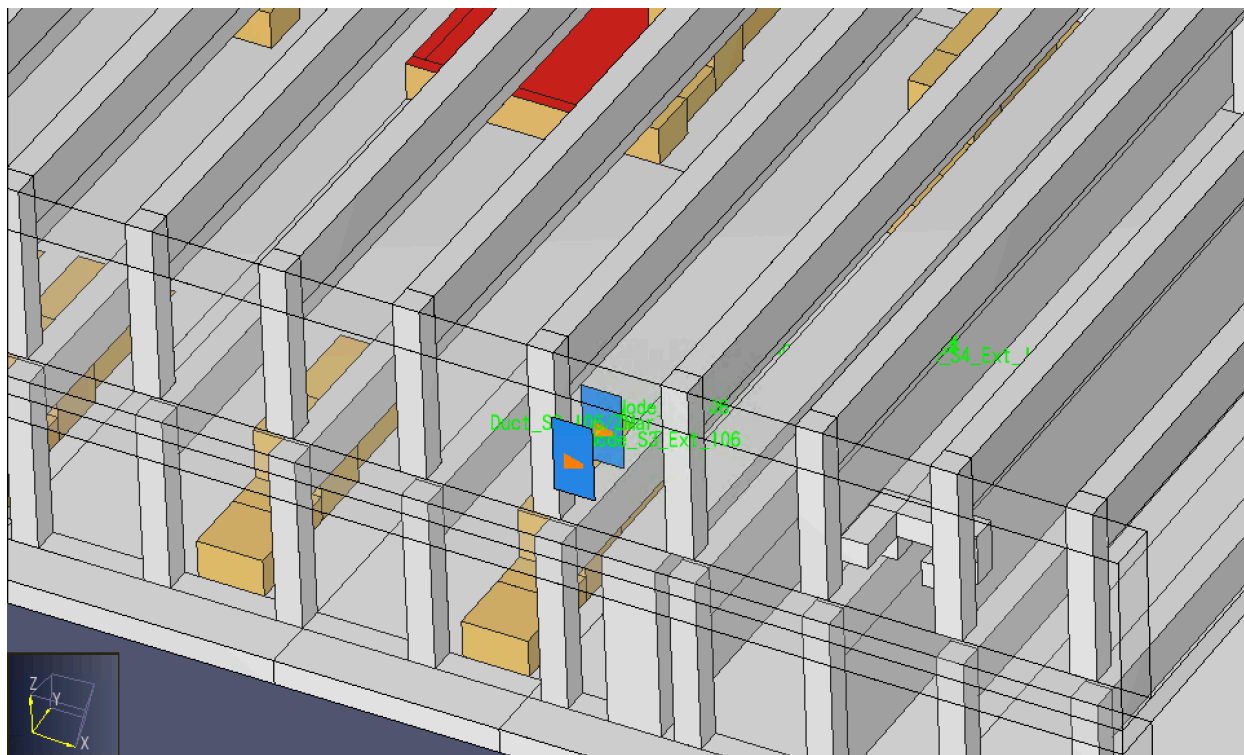


Figura 19 - Representació 3D de la geometria dissenyada amb Pyrosim del sistema de ventilació d'impulsió d'aire

4 Paràmetres a visualitzar

Els paràmetres a visualitzar al llarg de tot el temps de simulació juntament amb la seva ubicació estan concentrats en la planta PS-4 que és on està ubicat l'incendi. Per qüestions de cost computacional s'ha decidit focalitzar els elements de visualització els que afecten a tota la zona a l'entorn de l'incendi i com afecta a la planta PS-3. Els paràmetres seran els següents:

A. Difusió del fum en 3D

B. Talls longitudinals (Figura 20)

CL1 (Y=4m), CL2 (Y=16,8m)

- Velocitat del aire
- Temperatura
- Visibilitat
- Concentració d'oxigen
- Concentració de CO y CO₂

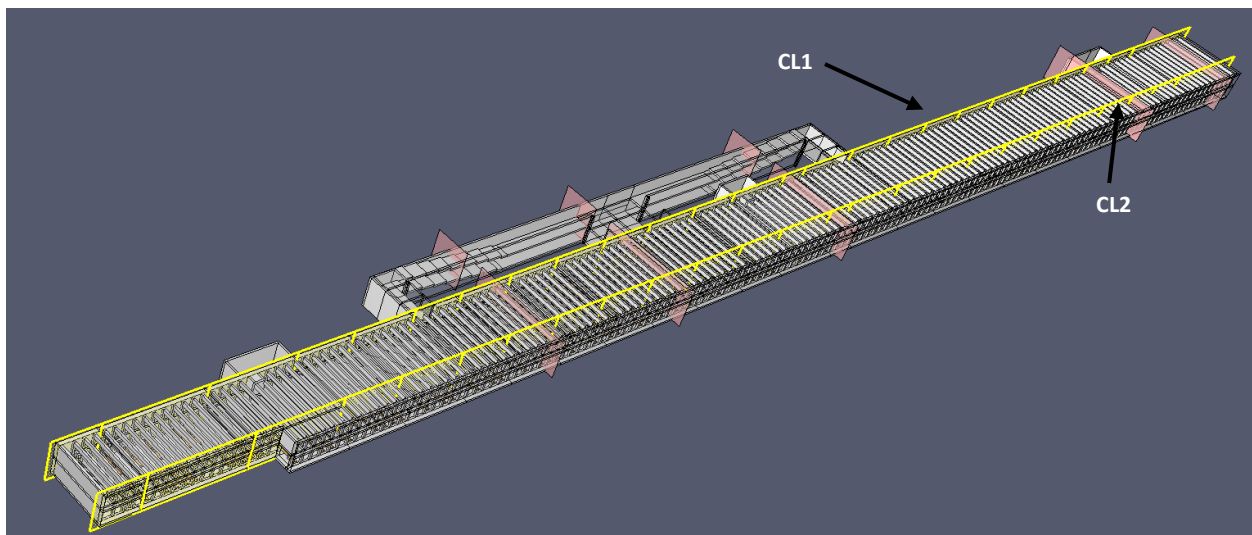


Figura 20 - Talls longitudinals (CL1,CL2,CL3 representats en groc)

• **Talls transversals (Figura 21)**

CT1 (X=96m), CT2 (X=130m), CT3 (X=178), CT4 (X=282m), CT5 (X=308m)

- Velocitat del aire
- Temperatura
- Visibilitat
- Concentració d'oxigen
- Concentració de CO y CO₂

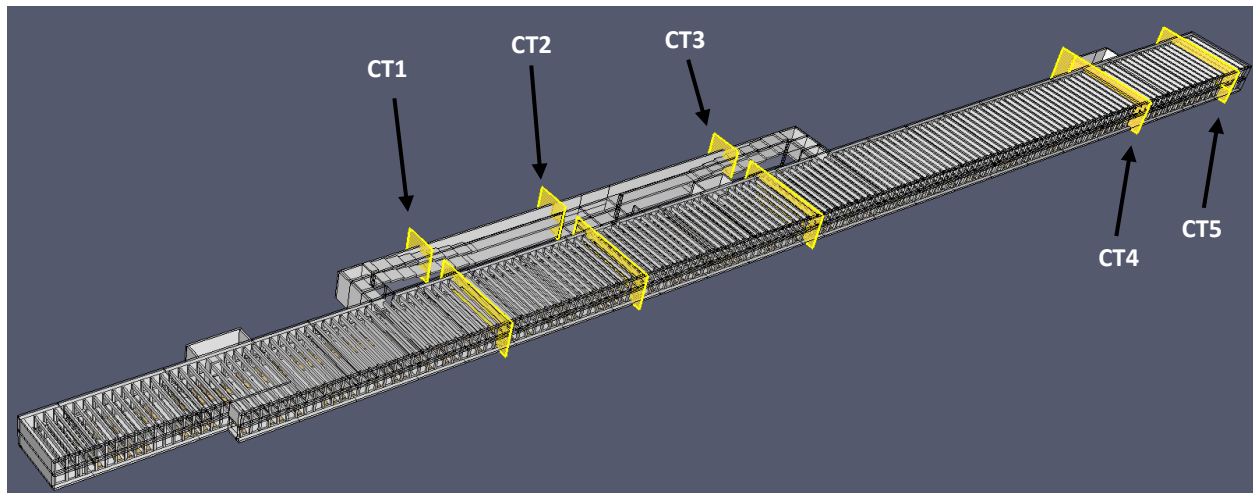


Figura 21 - Talls transversals (CT1,CT2,CT3, CT4 representats en groc)

Talls horitzontals (Figura 22)

- **Pla Z=1,8 m** (corresponent a la planta PS-4)
- **Pla Z=5,2 m** (corresponent a una altura d'1,8 m respecte el terra de la planta PS-3)
 - Velocitat del aire
 - Temperatura
 - Visibilitat
 - Concentració d'oxigen
 - Concentració de CO y CO₂

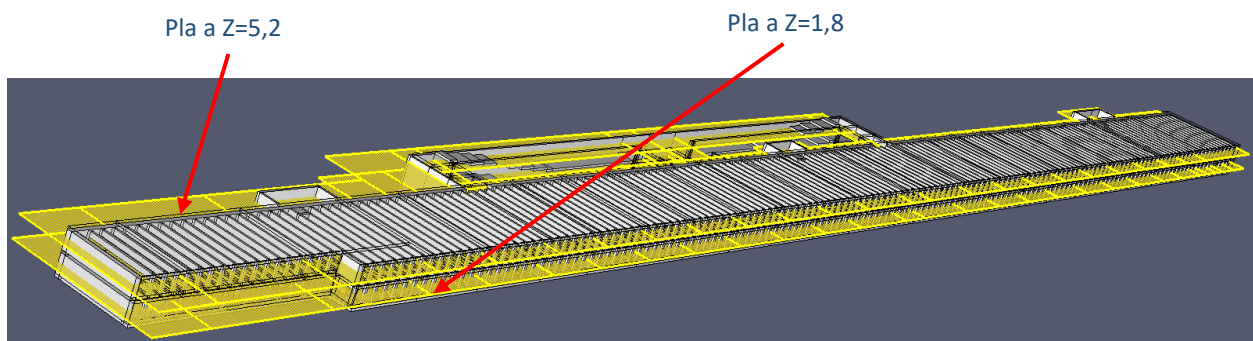


Figura 22 - Tall al pla Z=1,8 i Z=5,2 (representat en groc)

5 Resultats de l'escenari A (incendi al soterrani PS-4)

A continuació es mostren i comenten els resultats per a cadascun dels paràmetres analitzats, en el següent ordre:

- Velocitat de l'aire
- Difusió del fum 3D
- Visibilitat
- Temperatura
- Concentració d'oxigen
- Concentració de monòxid de carboni (CO)
- Concentració de diòxid de carboni (CO₂)

5.1 Velocitat de l'aire i funcionament del sistema de ventilació

En primer lloc s'ha analitzat que el sistema de ventilació definit en el model respongui de manera adequada, és a dir proporcioni velocitats semblants a les mesurades per SABA. La Figura 23 i la Figura 24 mostren la visió general dels ventiladors d'impulsió dels soterranis PS-3 i PS-4 respectivament.

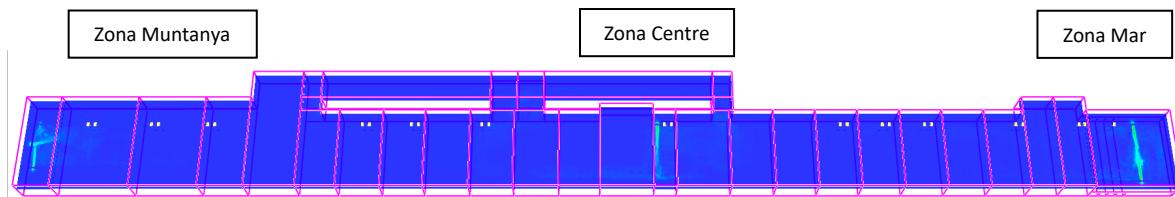


Figura 23 - Visualització general de les reixes d'impulsió de la planta PS-3 (Pla Z=5,2 m, t=1200 s)

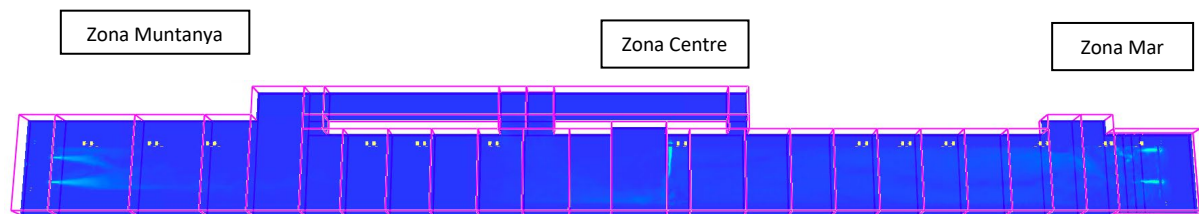


Figura 24 - Visualització general de les reixes d'impulsió de la planta PS-4 (Pla Z=1,8 m, t=1200 s)

La Taula 9 mostra els valors mesurats per SABA i els obtinguts amb FDS per a totes les reixes d'impulsió situades al soterrani PS-3. Com es pot observar els valors són prou semblants, fet que garanteix que la simulació sigui el màxim fidel a la realitat. La Figura 25, Figura 26 i Figura 27, mostren amb més detall la sortida d'aire a les reixes d'impulsió en un pla situat a 1,8 m d'altura.

Taula 9. Comparativa entre la velocitat mesurada i la proporcionada per FDS, a la sortida de les reixes d'impulsió del soterrani PS-3.

Zona	Ventiladors d'impulsió	Velocitat mesurada(m/s)	Velocitat FDS (m/s)
Muntanya	VENT_S3_I01	11,40	10
	VENT_S3_I02	15,15	12
	VENT_S3_I03	5,55	5
Centre	VENT_S3_I04	5,44	5
Mar	VENT_S3_I05	8,47	8,5
	VENT_S3_I06	8,47	8,5

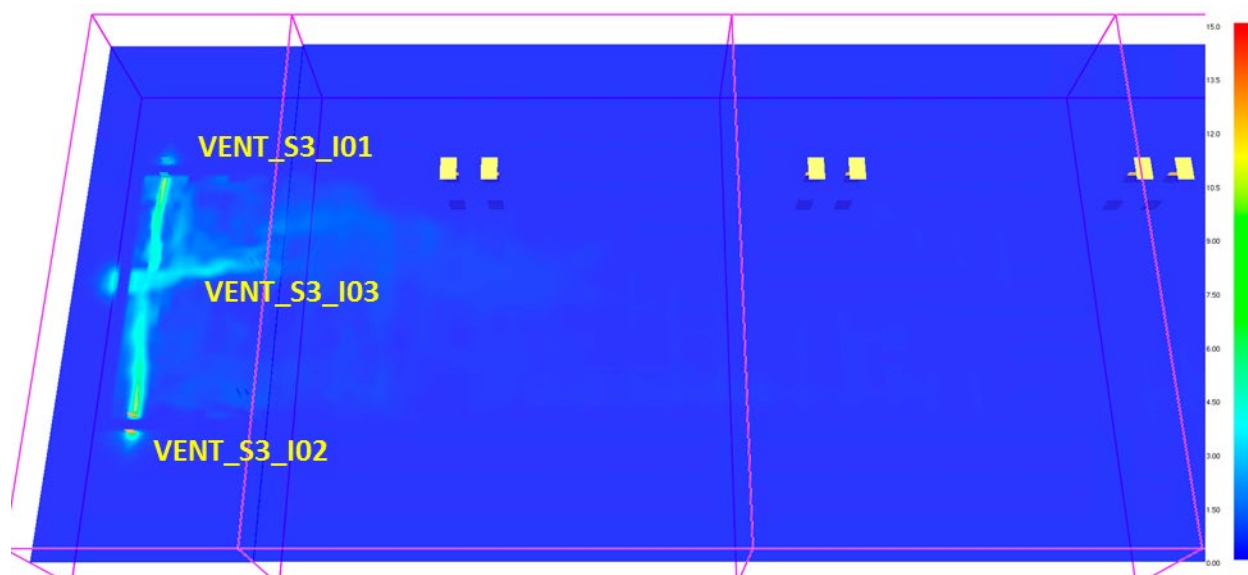


Figura 25- Reixes d'impulsió de la Zona Muntanya del soterrani PS-3 (Pla Z=1,8 m, t=1200 s)

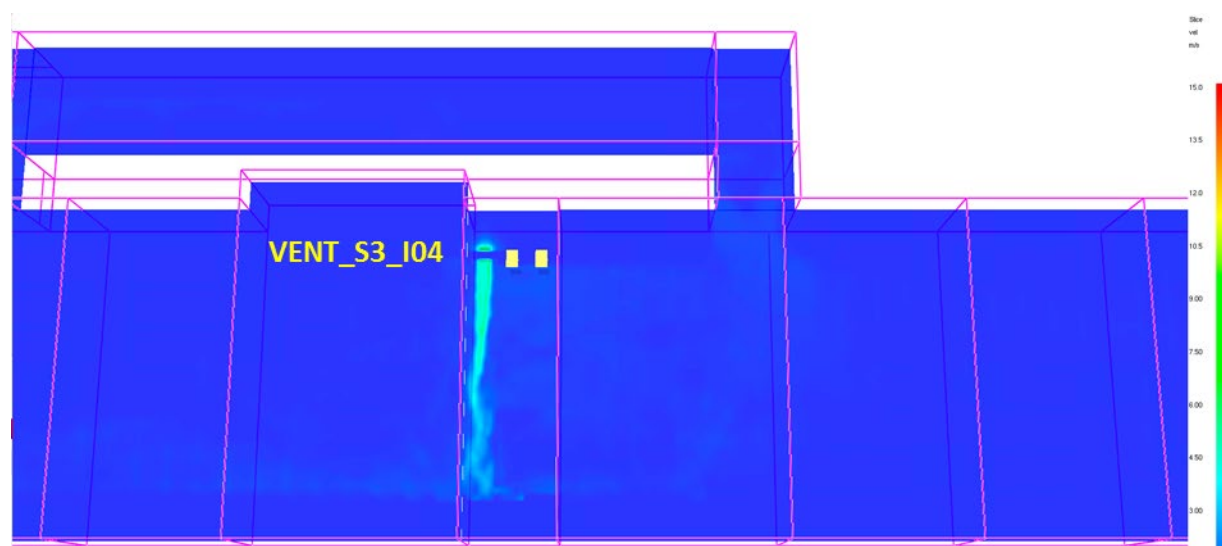


Figura 26- Reixes d'impulsió de la Zona Centre del soterrani PS-3 (Pla Z=1,8 m, t=1200 s)

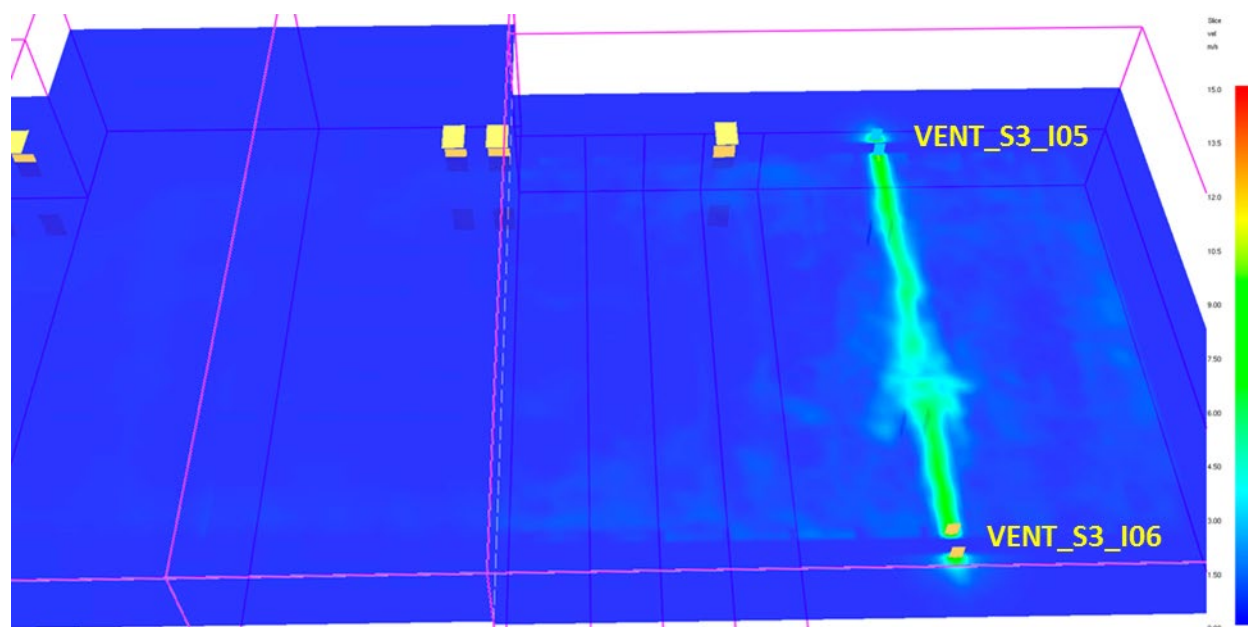


Figura 27- Reixes d'impulsió de la Zona Mar del soterrani PS-3 (Pla Z=1,8 m, t=1200 s)

En el soterrani PS-4, la situació és semblant (vegeu la Taula 10 i la Figura 28, Figura 29 i Figura 30). En general les velocitats obtingudes amb són lleugerament inferiors a les mesurades (podent arribar en alguns cas al 20%, tot i que en general les diferències són inferiors).

Taula 10. Comparativa entre la velocitat mesurada i la proporcionada per FDS, a la sortida de les reixes d'impulsió del soterrani PS-4.

Zona	Ventiladors d'impulsió	Velocitat mesurada(m/s)	Velocitat FDS (m/s)
Muntanya	VENT_S4_I01	11,72	10
	VENT_S4_I02	12,03	10
Centre	VENT_S4_I03	3,96	3
Mar	VENT_S4_I04	10,37	9
	VENT_S4_I05	10,37	9

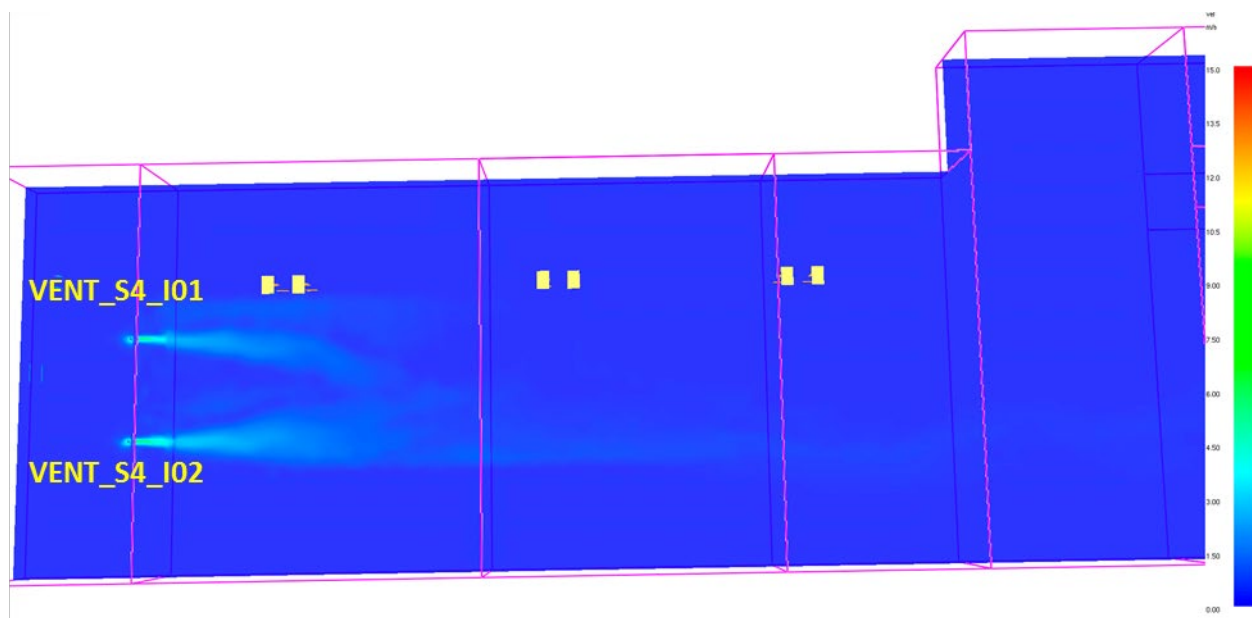


Figura 28- Reixes d'impulsió de la Zona Muntanya del soterrani PS-4 (Pla Z=1,8 m, t=1200 s)

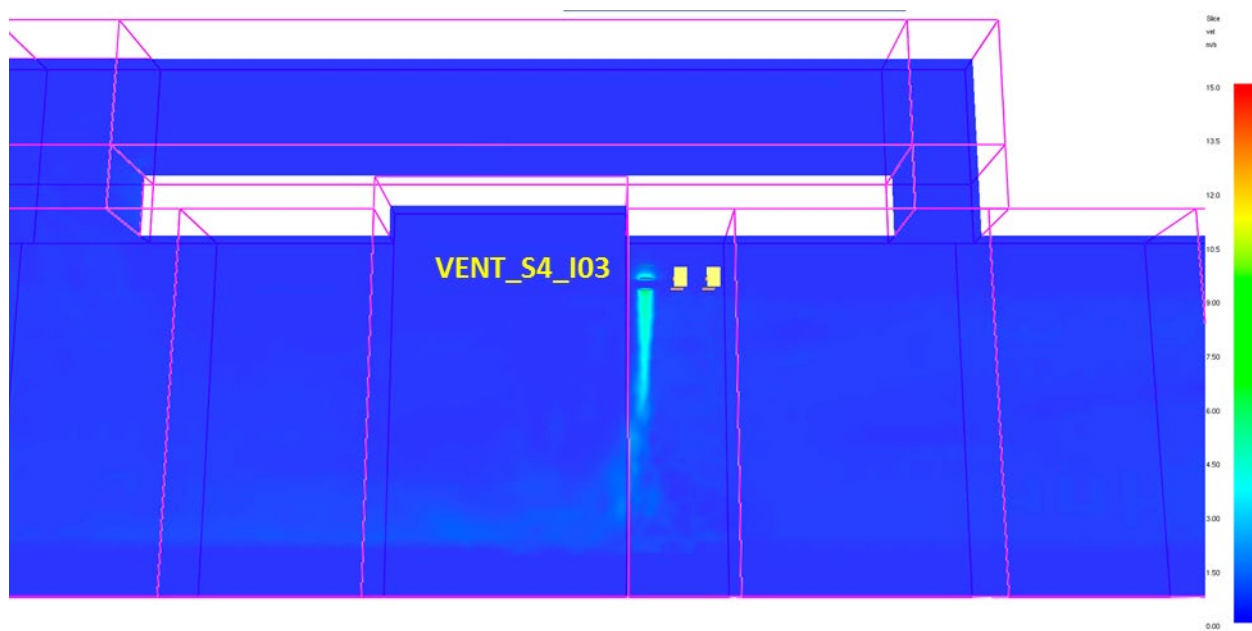


Figura 29- Reixes d'impulsió de la Zona Centre del soterrani PS-4 (Pla Z=1,8 m, t=1200 s)

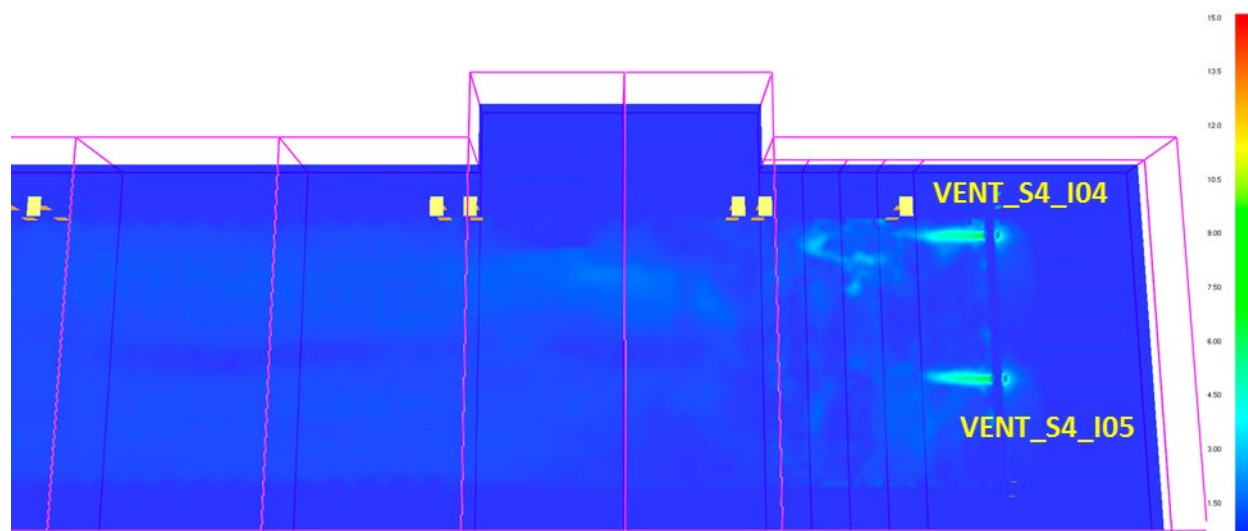


Figura 30- Reixes d'impulsió de la Zona Mar del soterrani PS-4 (Pla Z=1,8 m, t=1200 s)

5.2 Difusió de fum 3D

La Figura 31, Figura 32 i Figura 33 mostren l'evolució del fum al soterrani PS-4 al llarg de 10 minuts des de l'inici de l'incendi. Es pot observar com el fum avança de dreta a esquerra de la planta PS-4. Part d'aquest fum s'evacua a l'exterior per les obertures de les reixes horitzontals (sobrepessió).

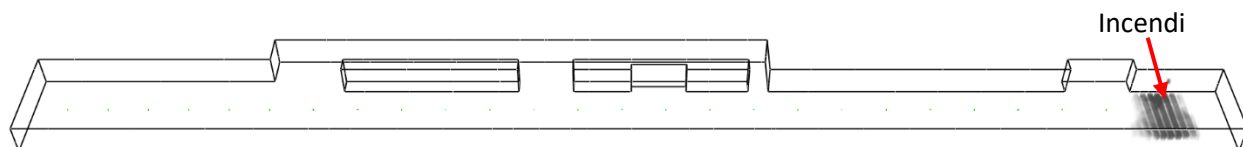


Figura 31- Difusió de fum 3D al soterrani PS-4 a Z = 1,8 m, a t= 1 minut

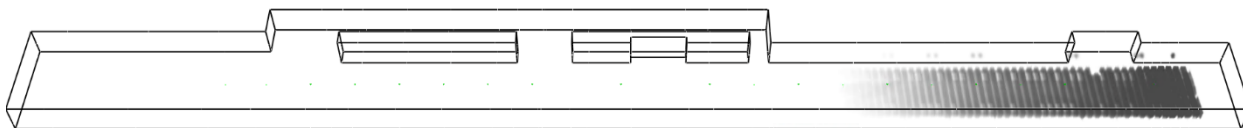


Figura 32- Difusió de fum 3D al soterrani PS-4 a Z = 1,8 m a t= 5 minuts

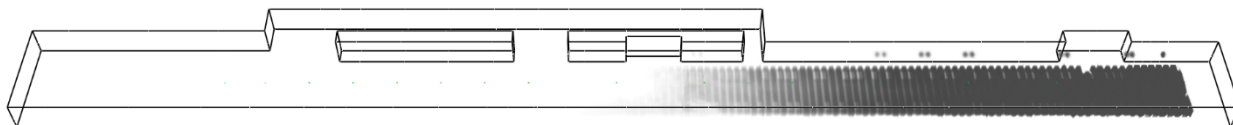


Figura 33- Difusió de fum 3D al soterrani PS-4 a Z = 1,8 m a t= 10 minuts

Fins passat 15 minuts el fum no arriba a la meitat de la planta PS-4, moment en el qual el fum comença a entrar per la rampa (Figura 34).

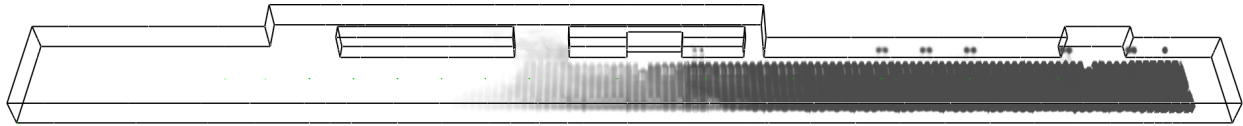


Figura 34 - Difusió de fum 3D al soterrani PS-4 a $Z = 1,8$ m a $t = 15$ minuts

La Figura 35 mostra com passats 25 minuts el fum s'estén per la rampa arribant pràcticament al soterrani PS-3. Aquest fet es produeix quan l'incendi ha arribat al pic màxim de potència i, en conseqüència, la producció de fum és màxima. Gran part del fum està concentrat en la zona més propera a l'incendi fins arribar a la rampa on comença a expandir-se.

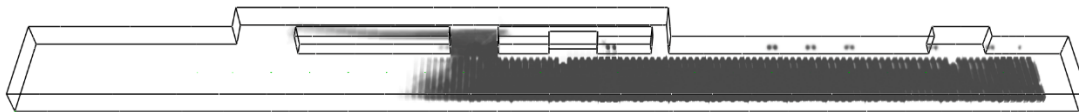


Figura 35- Difusió de fum 3D al soterrani PS-4 a $Z = 1,8$ m a $t = 25$ minuts

A partir dels 30 minuts el fum arriba finalment a la planta PS-3 (Figura 36). Però en el mateix moment comença el desenfumatge de la planta PS-4, ja que l'incendi ja s'ha acabat.

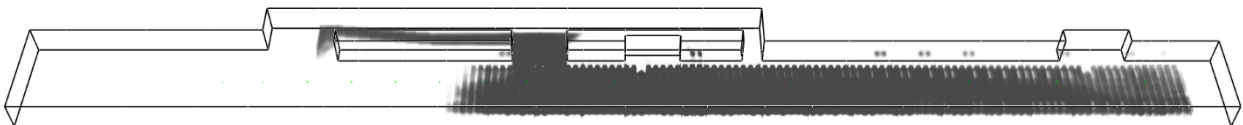


Figura 36- Difusió de fum 3D al soterrani PS-4 a $Z = 1,8$ m a $t = 30$ minuts

Passats 5 minuts, es veu clarament que el desenfumatge continua i el fum molt lentament ha entrat a la planta PS-3.

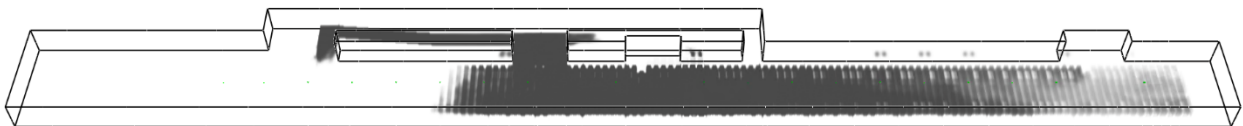


Figura 37- Difusió de fum 3D al soterrani PS-4 a $Z = 1,8$ m a $t = 35$ minuts

A la Figura 38 es pot veure com després de 45 minuts, el fum ha entrat al soterrani PS-3.

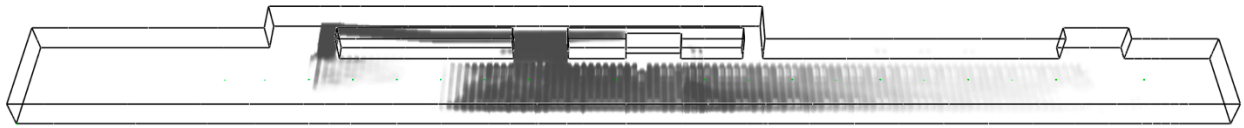


Figura 38 - Difusió de fum 3D al soterrani PS-4 a $Z = 1,8 \text{ m}$ a $t = 45 \text{ minuts}$

La Figura 39 mostra el pàrquing amb la geometria dels cotxes (representats en groc) per veure també una visualització més realista. Es pot veure com la zona de l'incendi ha quedat neta i el desenfumatge arriba fins a la meitat del soterrani PS-4. La Figura 40 mostra una ampliació de la zona de la rampa que permet observar millor el fum que afecta al soterrani PS-3. Es pot observar que el fum es concentra principalment a la rampa i el fum que entra a la PS-3 és poc dens.

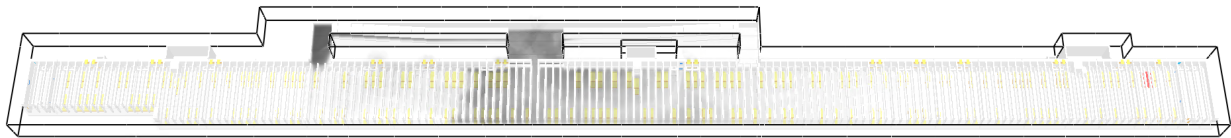


Figura 39 - Difusió de fum 3D al soterrani PS-4 a $Z = 1,8 \text{ m}$ a $t = 50 \text{ minuts}$

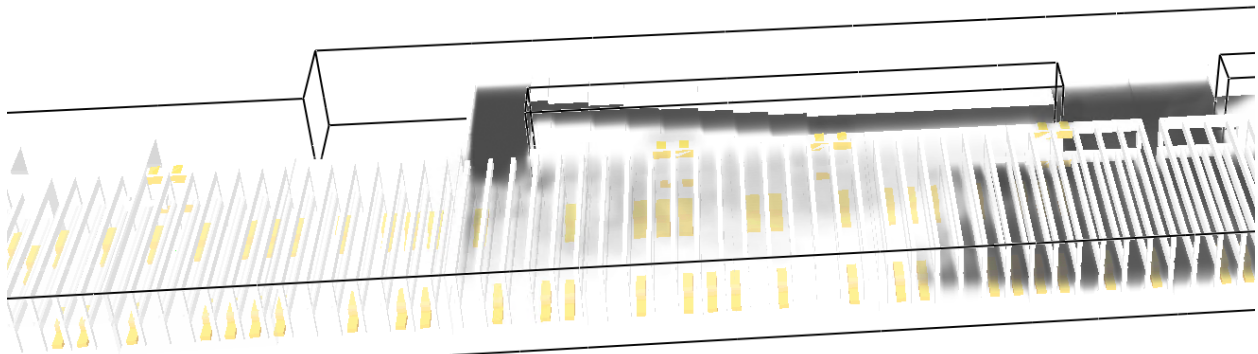


Figura 40- Ampliació de la zona de la rampa per visualitzar l'afectació de fum al soterrani PS-3 a $t = 50 \text{ minuts}$

Per finalitzar, la Figura 41 mostra com al cap d'una hora de l'inici de l'incendi, els soterranis PS-4 i PS-3 i la rampa estan totalment lliures de fum.

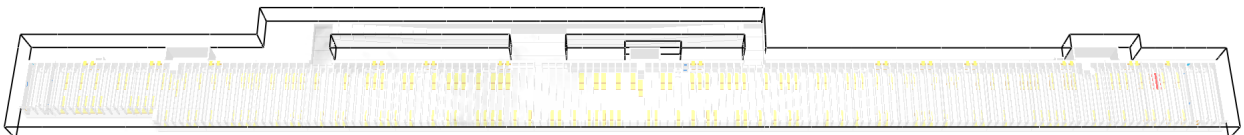


Figura 41 . Difusió de fum 3D a $t = 60 \text{ minuts}$

5.3 Visibilitat

La visibilitat és un paràmetre molt important per garantir la seguretat dels ocupants durant la fase d'evacuació. La guia tècnica GTC.SP.001 V.2 2017 dels bombers de la generalitat estableixen com a criteri una visibilitat mínima de 20 m a 1,8 m d'altura, per tal de garantir l'evacuació segura dels ocupants (exceptuant un perímetre de 10 m al voltant de l'incendi, que s'entén que això no serà mai possible). L'evacuació sol tenir lloc durant els 10 primers minuts des de l'inici de l'incendi i per tant és principalment durant aquest període de temps que ha d'estar garantida la visibilitat. La Figura 42 mostra el valor de visibilitat abans de l'inici de l'incendi, que és de l'ordre de 30 m, al soterrani PS-4 a una altura de 1,8 metres.

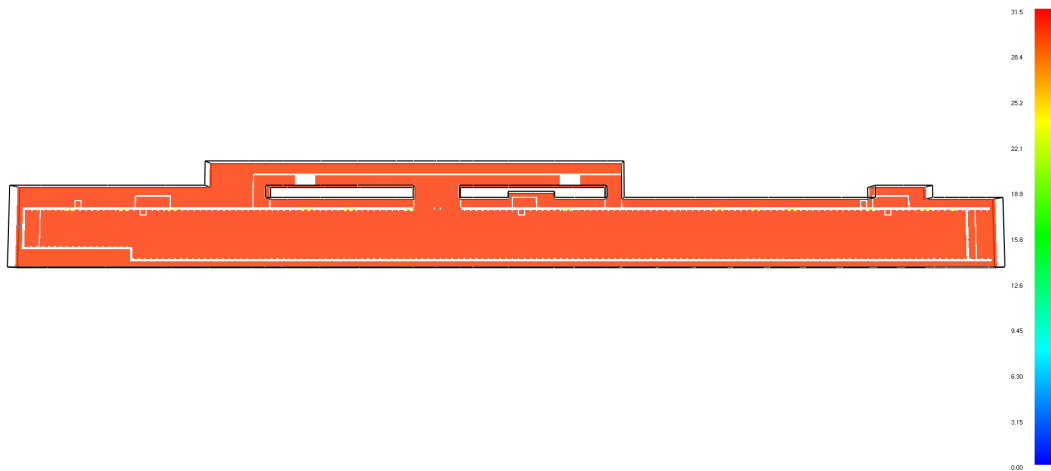


Figura 42 - Visibilitat al pla Z=1,8 m al moment inicial

A la Figura 43 es pot observar com al cap de 5 minuts de l'inici de l'incendi, la visibilitat de la zona mar del soterrani PS-4 a una altura d'1,8 m ja està per sota dels 20 m, essent en una àrea important, gairebé nul·la. La Figura 44, mostra a través de talls longitudinals com aquesta manca de visibilitat arriba pràcticament fins el terra.

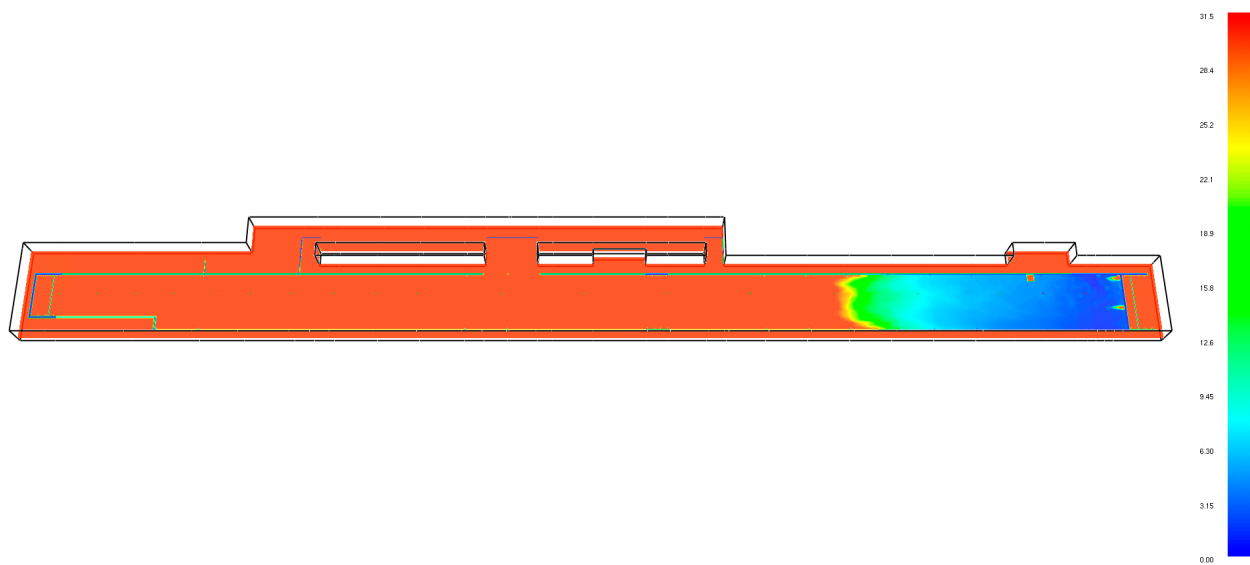


Figura 43- Visibilitat al soterrani PS-4 al pla Z=1,8 m, a t= 5 minuts

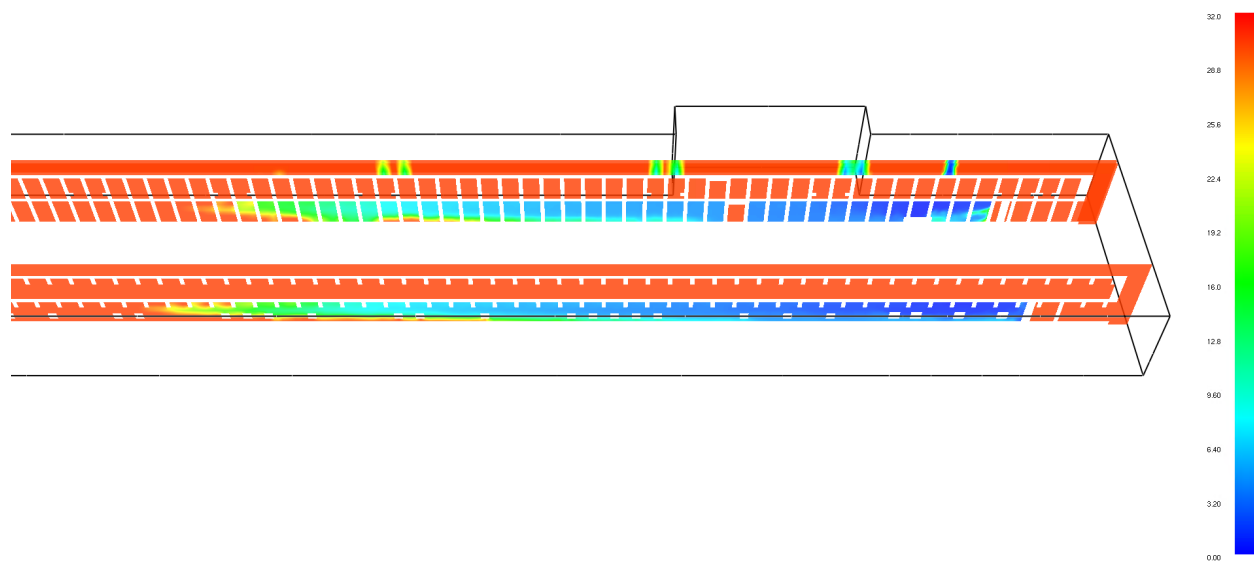


Figura 44 - Visibilitat al soterrani PS-4 als talls longitudinals CL1 i CL2, a t= 5 minuts

Al cap de 10 minuts es veu, tant en el pla Z=1,8 corresponent a la Figura 45, com als talls longitudinals CL1 i CL2 de la Figura 46, com la visibilitat continua essent nul·la i el fum es va estenent de dreta a esquerra del soterrani PS-4.

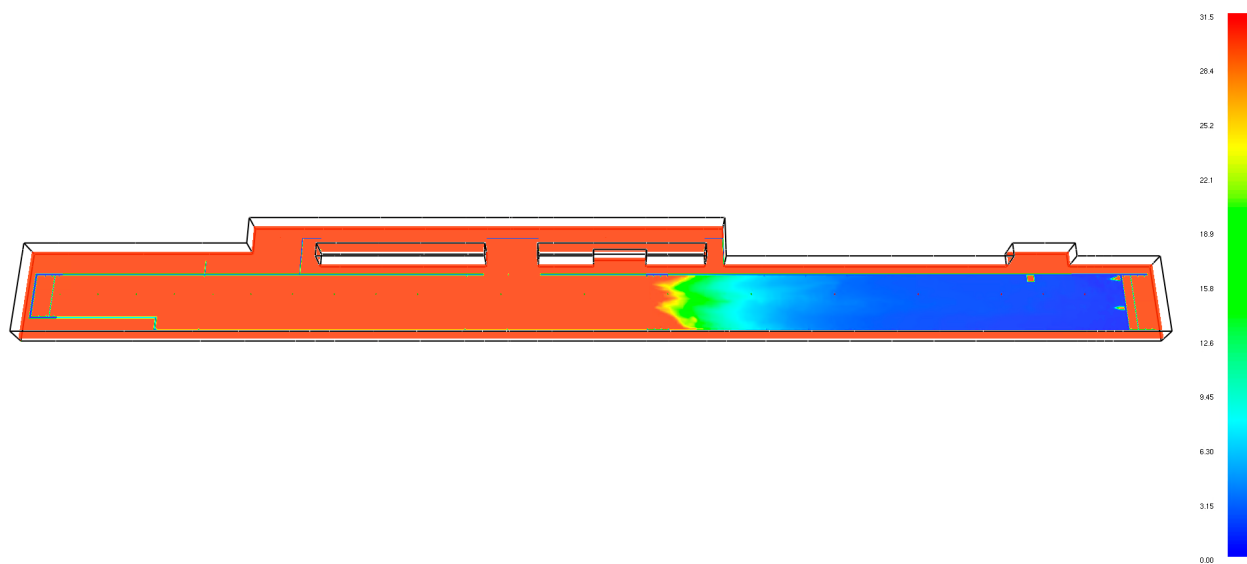


Figura 45- Visibilitat al soterrani PS-4 al pla Z=1,8 m, a t= 10 minuts

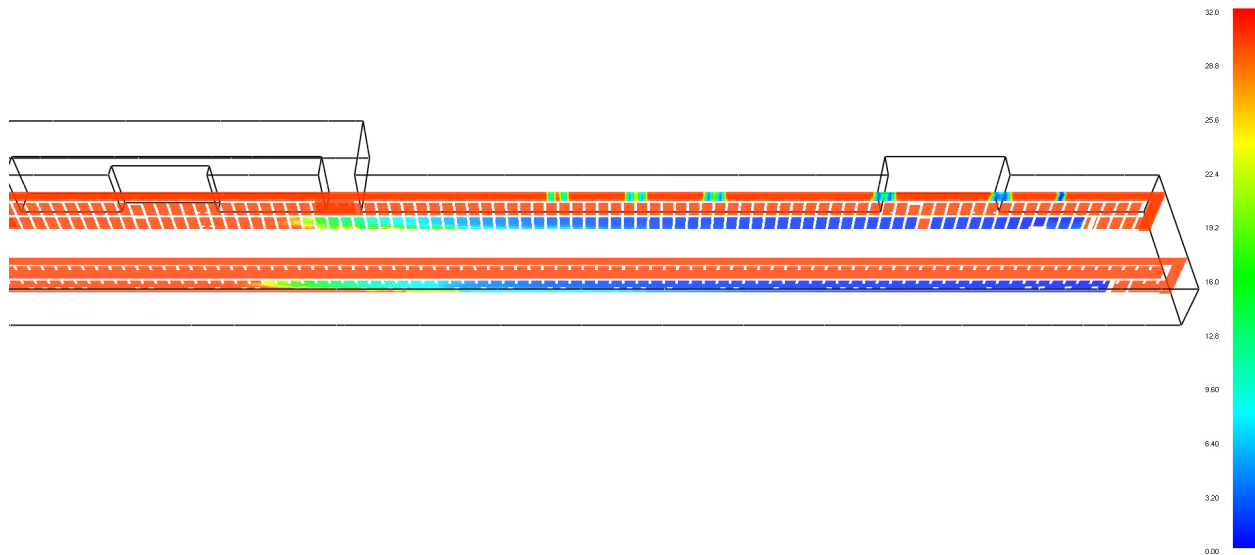


Figura 46- Visibilitat al soterrani PS-4 als talls CL1 i CL2, a t= 10 minuts

Al cap de 30 minuts, a la fi de l'incendi, la visibilitat és nul·la a una altura d'1,8 m en més de la meitat del soterrani PS-4 i part de la rampa d'accés al soterrani PS-3 (Figura 47 i Figura 48). A la Figura 49 i la Figura 50 es veuen els talls longitudinals i transversals respectivament, on es pot observar que la visibilitat és nul·la pràcticament fins a nivell de terra. També es pot observar com a prop d'on hi havia l'incendi ja s'ha iniciat el desenfumatge i la visibilitat comença a millorar. També es pot veure en els talls transversals com entra aire net a través de les reixes d'impulsió.

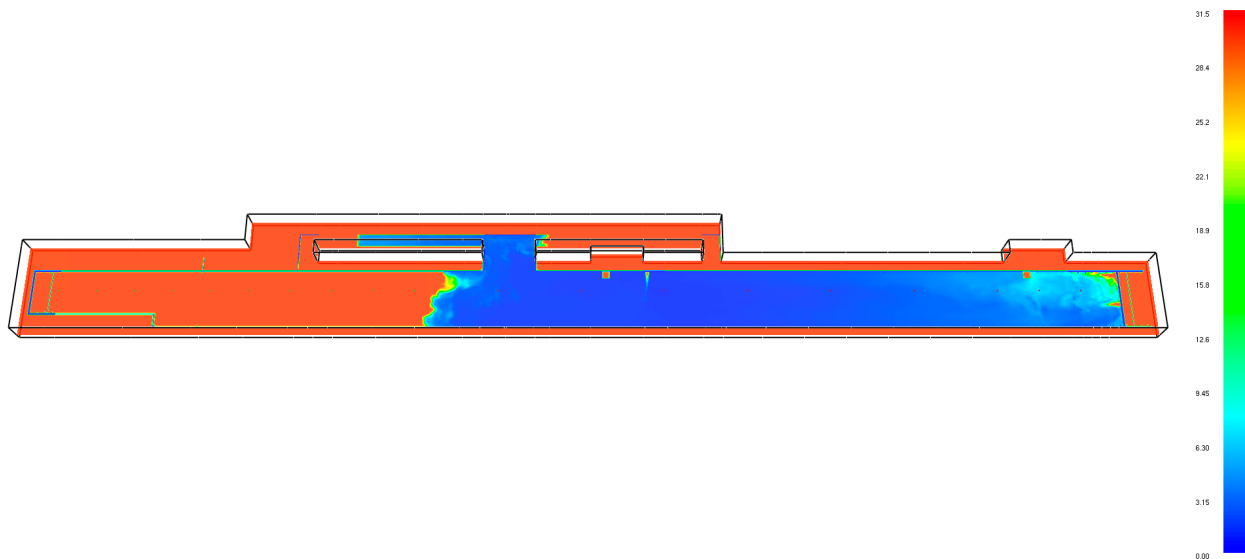


Figura 47 - Visibilitat al soterrani PS-4 al pla Z=1,8 m, a t= 30 minuts

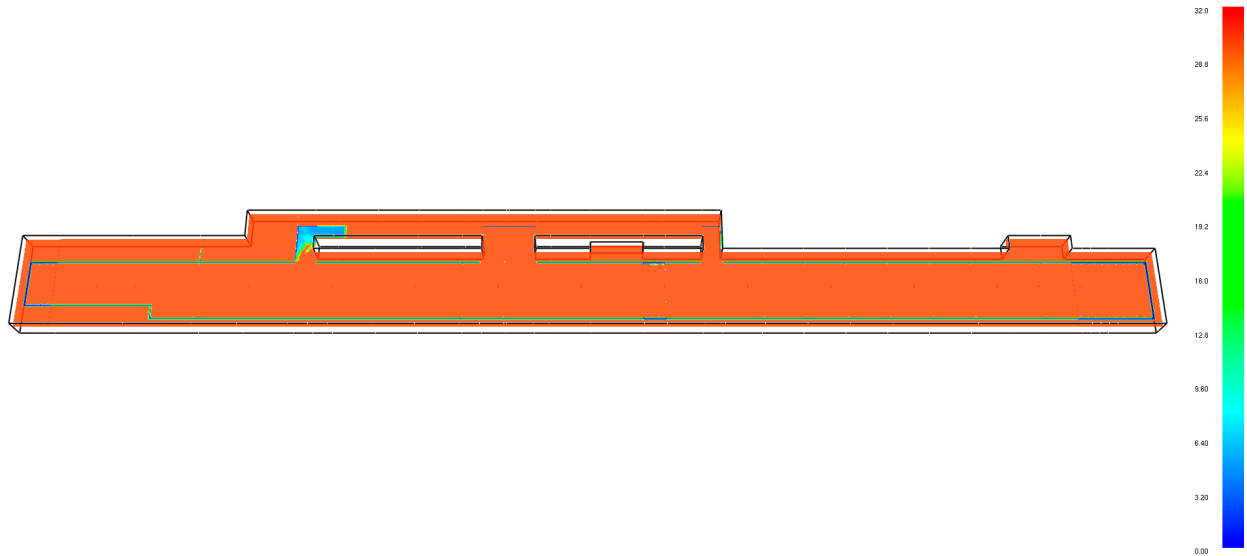


Figura 48 - Visibilitat al soterrani PS-3 al pla Z=5,2 m (1,8 m respecte el terra del soterrani PS-3), a t= 30 minuts

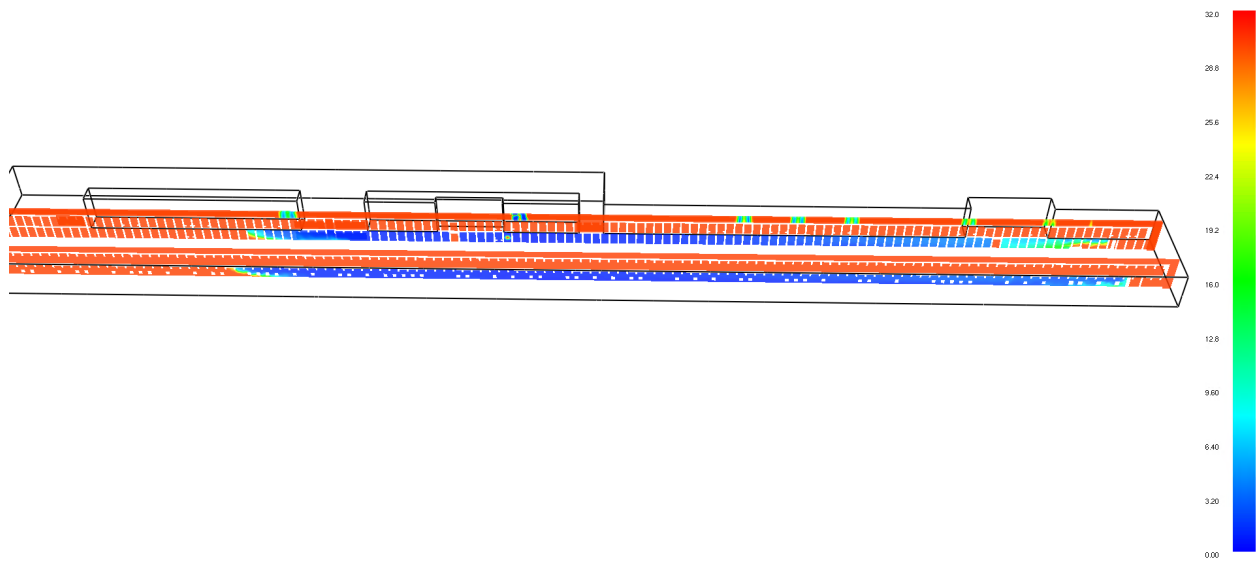


Figura 49- Visibilitat als talls longitudinals CL1 i CL2 a t= 30 minuts

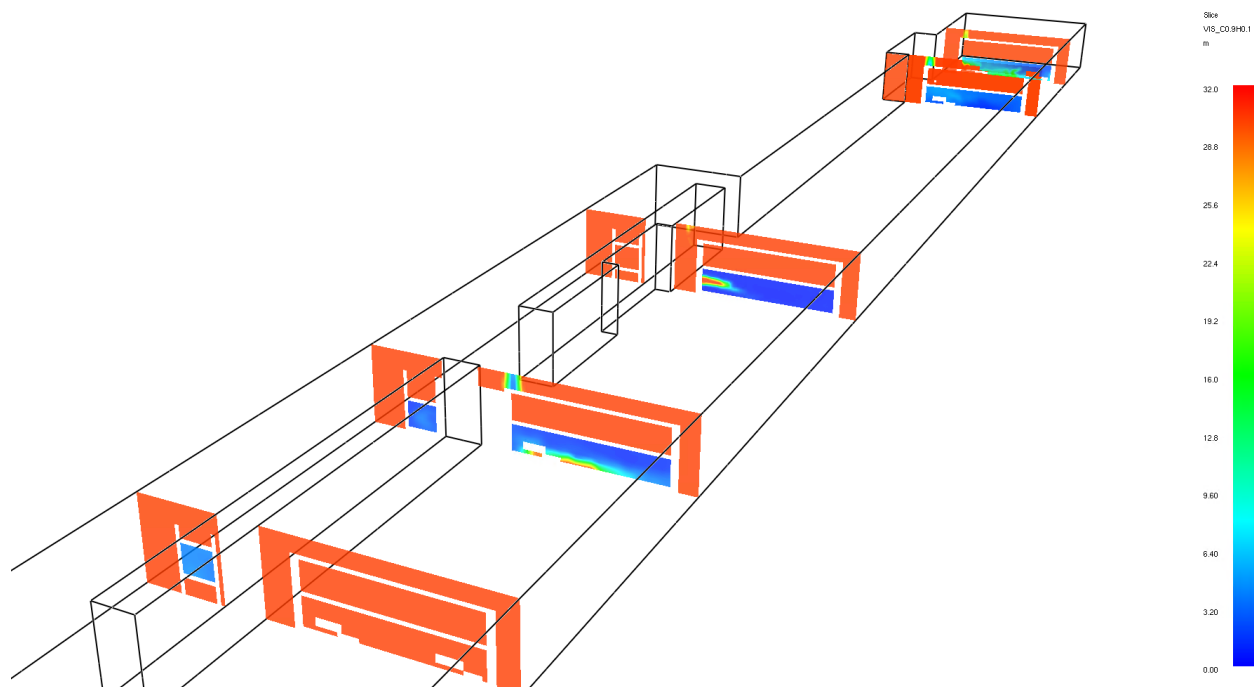


Figura 50 - Visibilitat als talls transversals CT2,CT3 i CT4 i CT5 a t= 30 minuts

Passats 40 minuts des de l'inici de l'incendi, la visibilitat és bona a la zona mar i continua avançant cap a la zona centre del soterrani PS-4. La Figura 51 i la Figura 52 ens mostren com la visibilitat encara és nul·la a la rampa d'accés al soterrani PS-3. Els talls longitudinals que es mostren a la Figura 52, també ho confirmen.

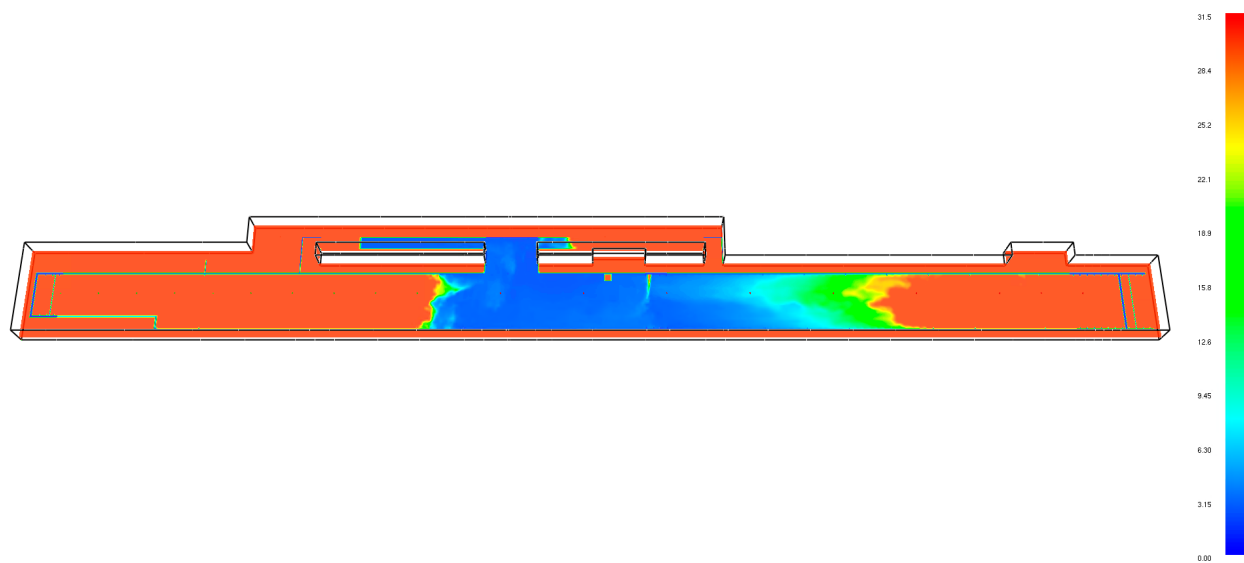


Figura 51- Visibilitat al soterrani PS-4 al pla Z=1,8 m, a t= 40 minuts.

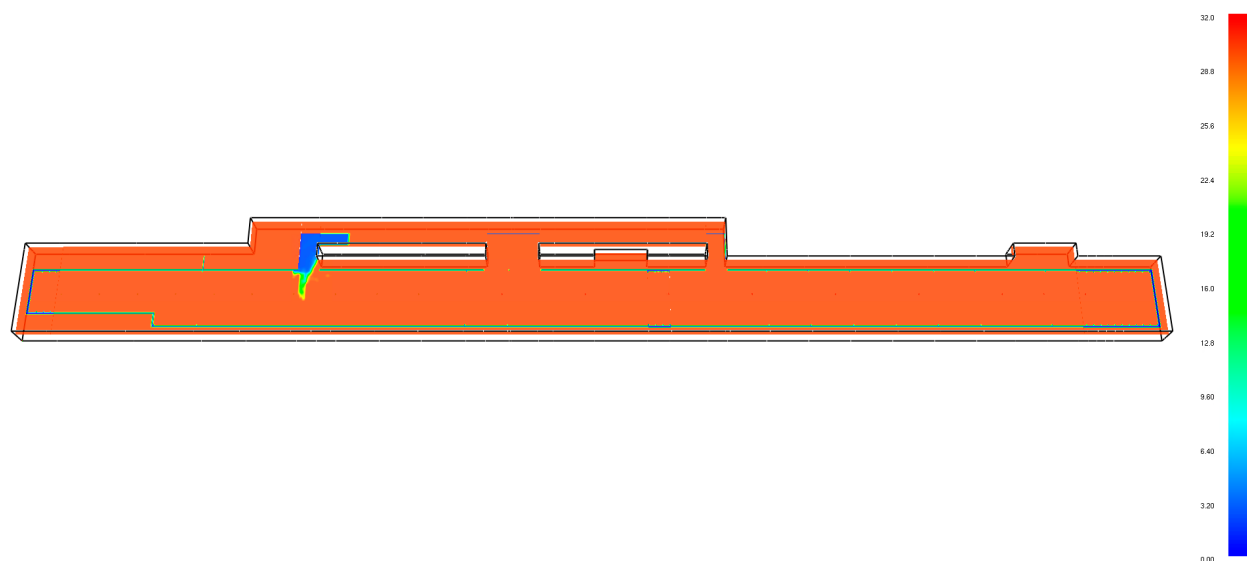


Figura 52 - Visibilitat al soterrani PS-3 al pla Z=5,2 m (a 1,8 m del terra), a t= 40 minuts

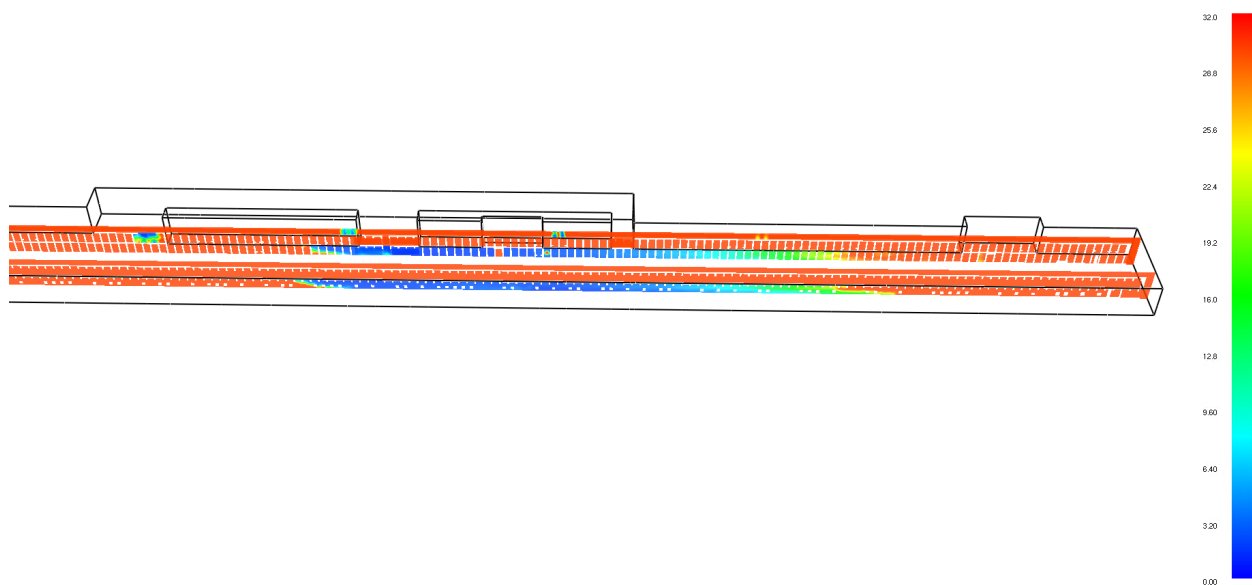


Figura 53- Visibilitat als talls longitudinals CL1 i CL2, a t= 40 minuts

Transcorreguts 50 minuts la visibilitat de la planta PS-4, tal i com es pot observar a la Figura 54 i la Figura 55, encara queda afectada la zona central i la rampa d'accés al soterrani PS-3 però amb valors que s'acosten ja als 20 m. Tota la zona corresponent a la zona mar està neta. De la mateixa manera al soterrani PS-3 i a part de la rampa el desenfumatge s'ha pràcticament completat.

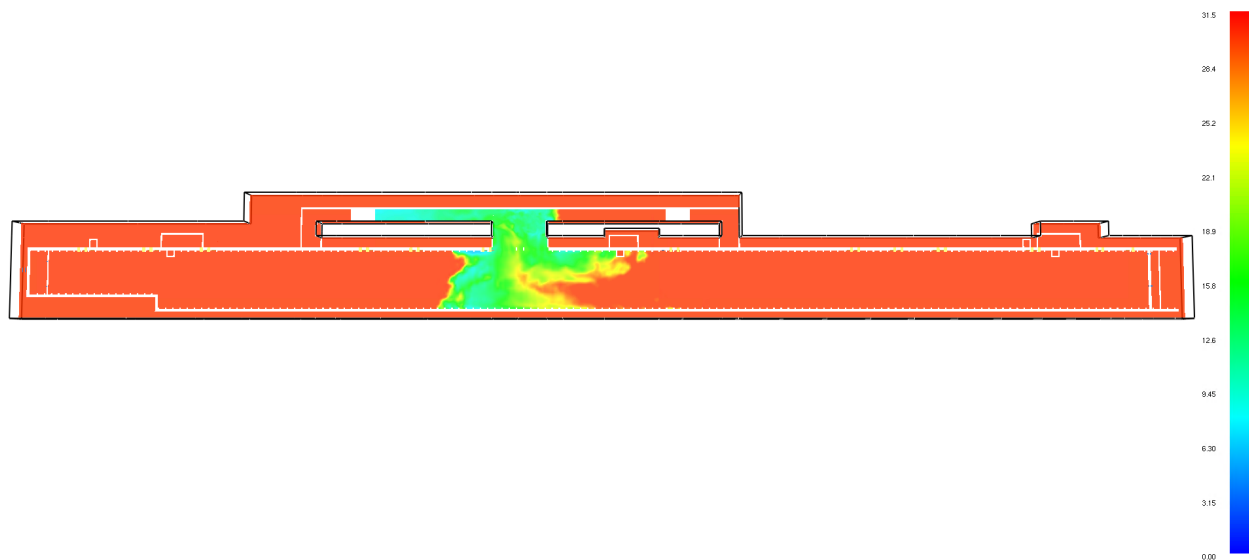


Figura 54- Visibilitat al soterrani PS-4 al pla Z=1,8 m, a t= 50 minuts

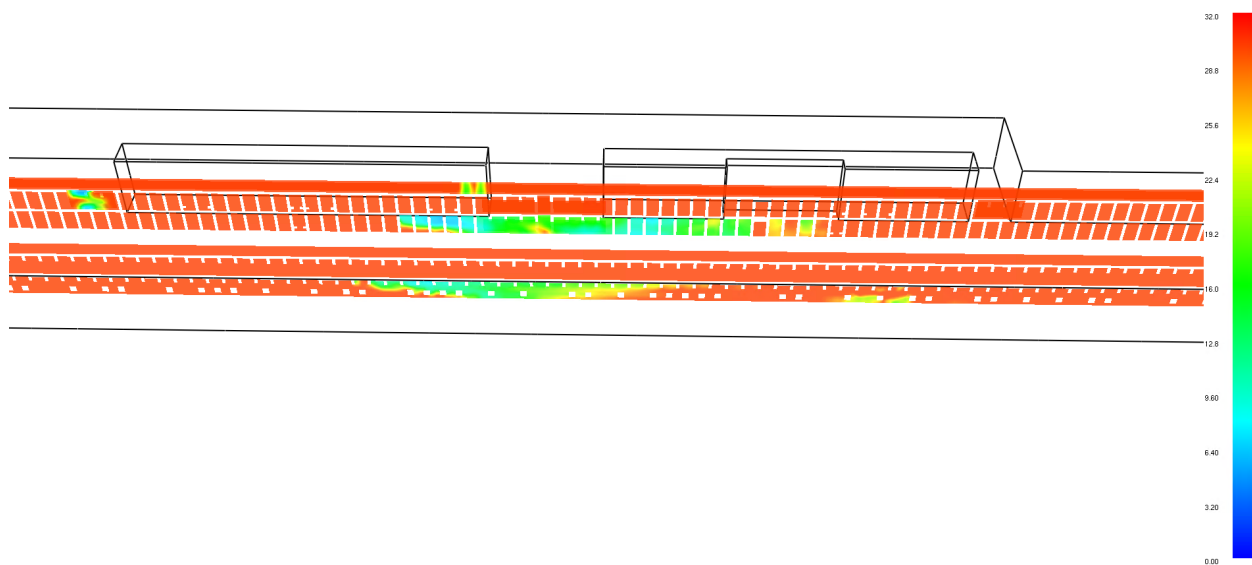


Figura 55 - Visibilitat als talls longitudinals CL1 i CL2 a t= 50 minuts

La Figura 56, es pot veure que després de 57 minuts les plantes PS-3 i PS-4 estan lliures de fum i la visibilitat és completa.

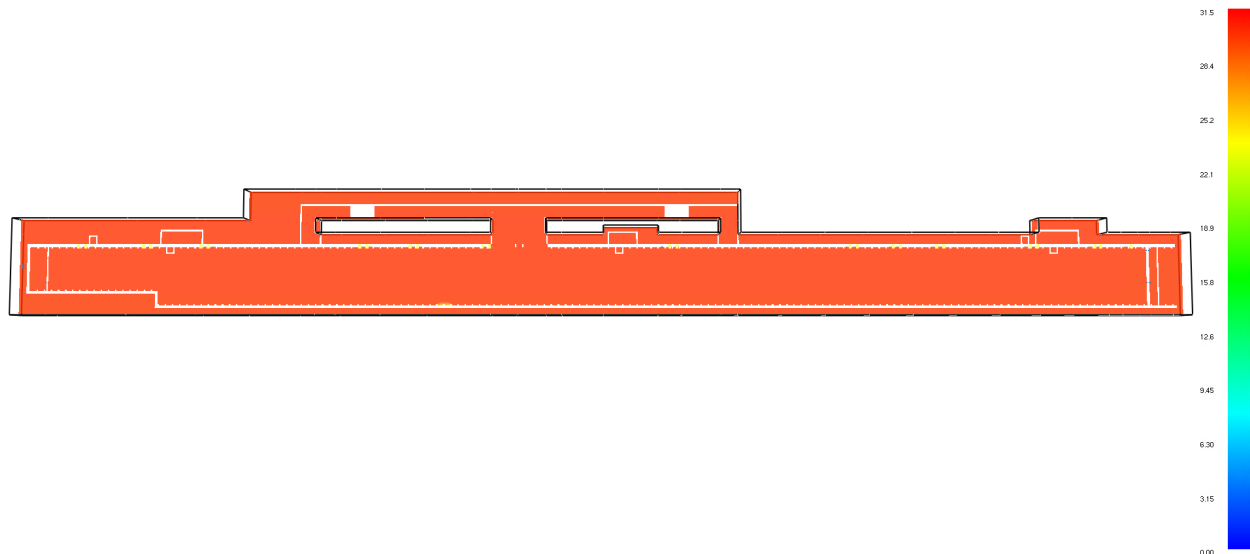


Figura 56 - Visibilitat al soterrani PS-4 al pla Z=1,8 m, a t= 57 minuts

5.4 Temperatura

La temperatura és un paràmetre que manté una relació directa amb la presència de fum i flames. És per aquest motiu que les zones amb major presència de fum tindran un valor de temperatura més elevat. [Bombers de la Generalitat de Catalunya, 2017] estableix com a criteri d'acceptació un valor inferior a 60 °C a una altura de 1,8 metres en els recorreguts d'evacuació amb la finalitat de garantir unes condicions segures pels ocupants. La Figura 57, mostra com abans de l'inici de l'incendi la temperatura a tot el soterrani Ps-4 és de 20 °C.

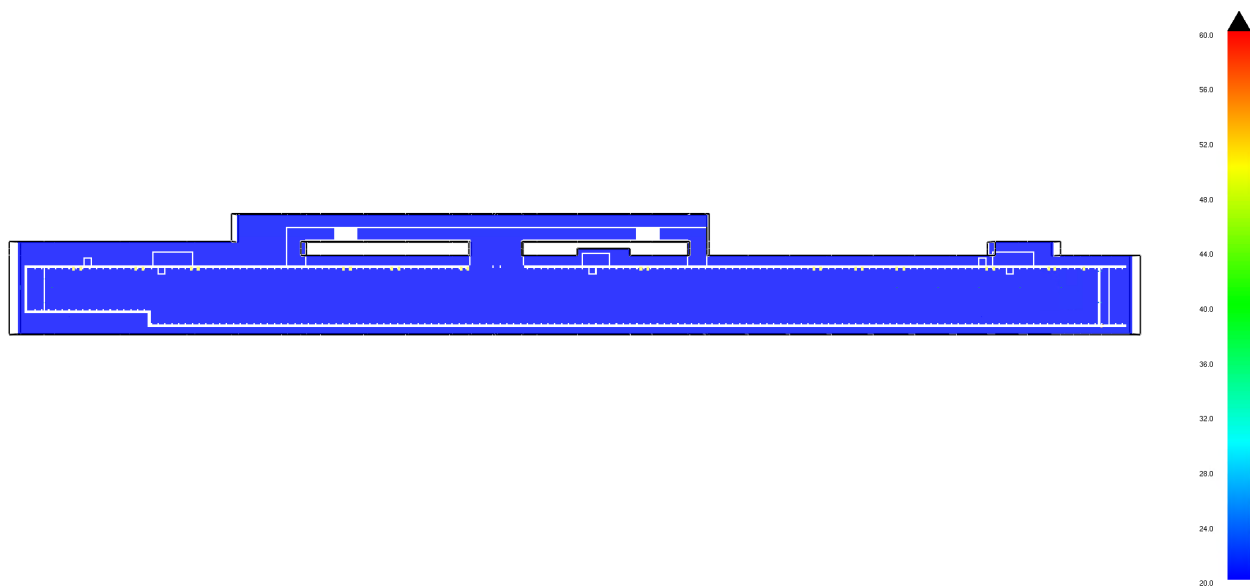


Figura 57 - Temperatura al soterrani PS-4 al pla Z=1,8 m, moment inicial

Passats 5 minuts de l'inici de l'incendi, es pot observar a la Figura 58, Figura 59 i Figura 60 com els valors més alts de temperatura corresponen a la zona on està situat l'incendi. La temperatura no suposa un risc per les persones durant l'evacuació dels ocupants en el 5 primers minuts.

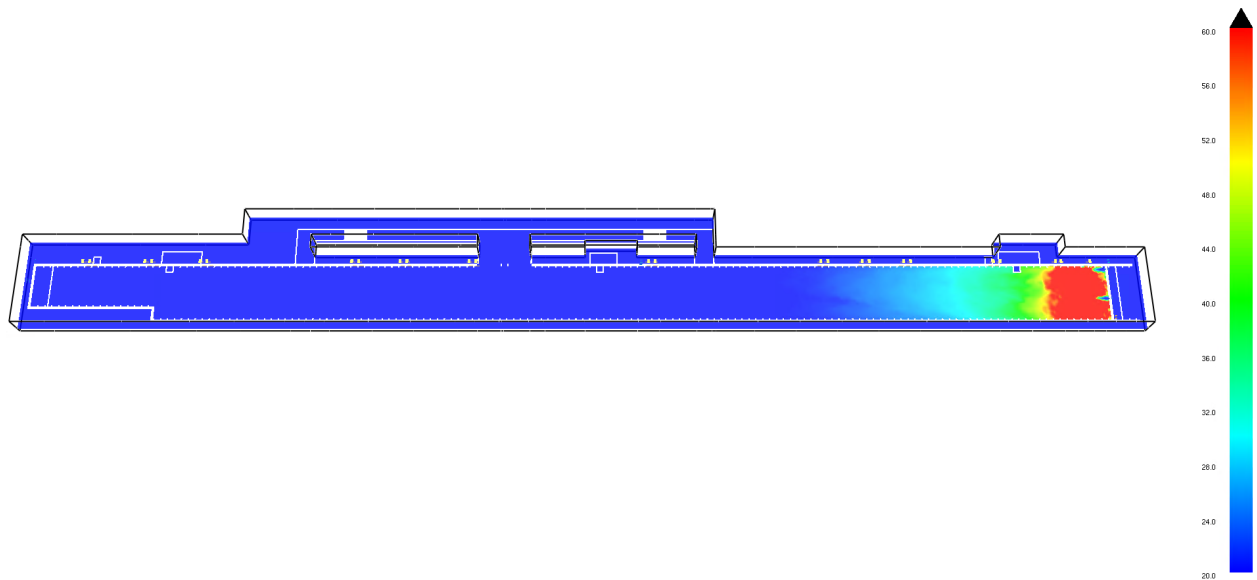


Figura 58 – Temperatura al soterrani PS-4 al pla Z=1,8 m, a t= 5 minuts

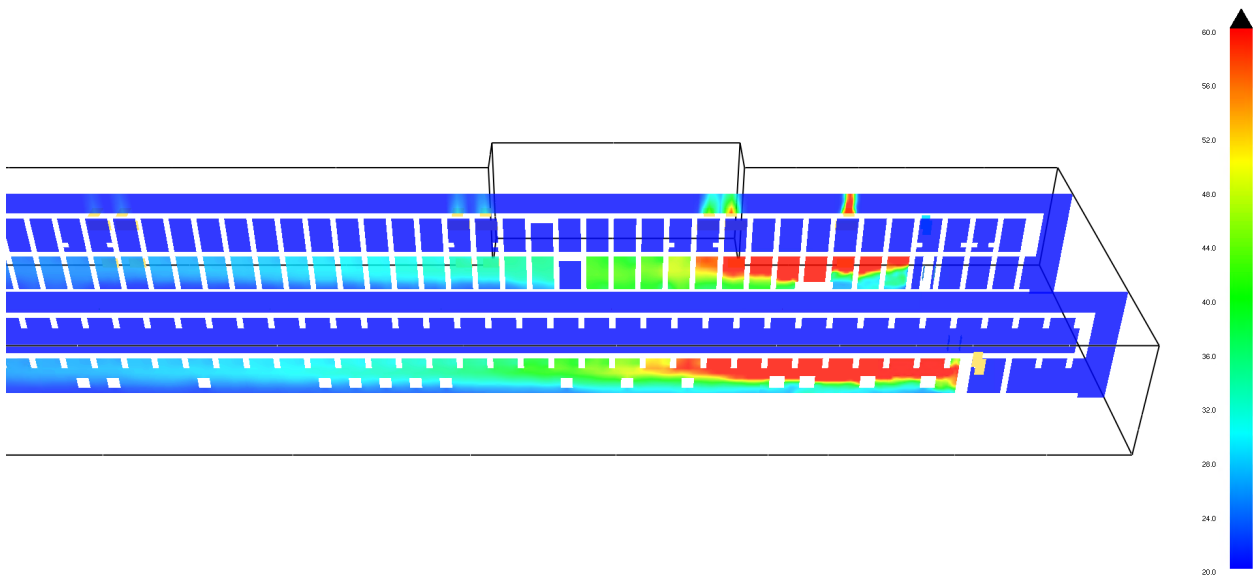


Figura 59 - Temperatura als tallers CL1 i CL2 a t=300s

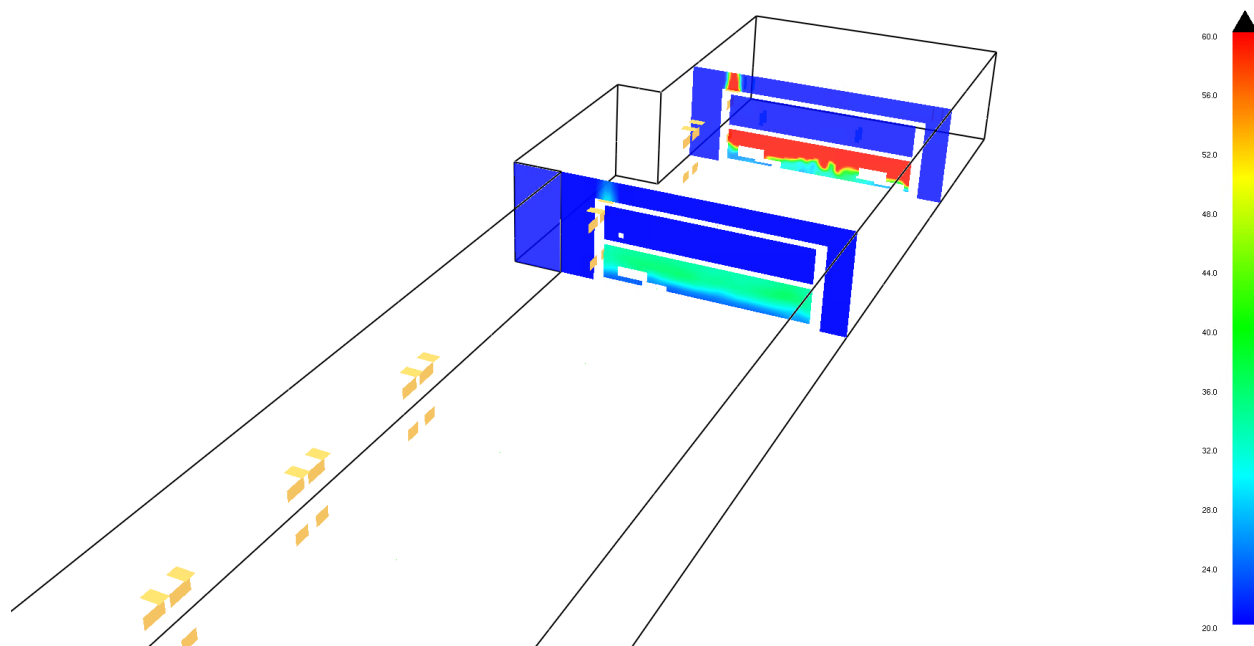


Figura 60 - Temperatura als talls CT4 i CT5 a t=300s

Al cap de 10 minuts la situació és semblant (Figura 61, Figura 62, Figura 63), es pot dir per tant que durant l'evacuació es compleix el criteri de temperatura, ja que el valor de 60 °C només s'assoleix en la zona propera a l'incendi.

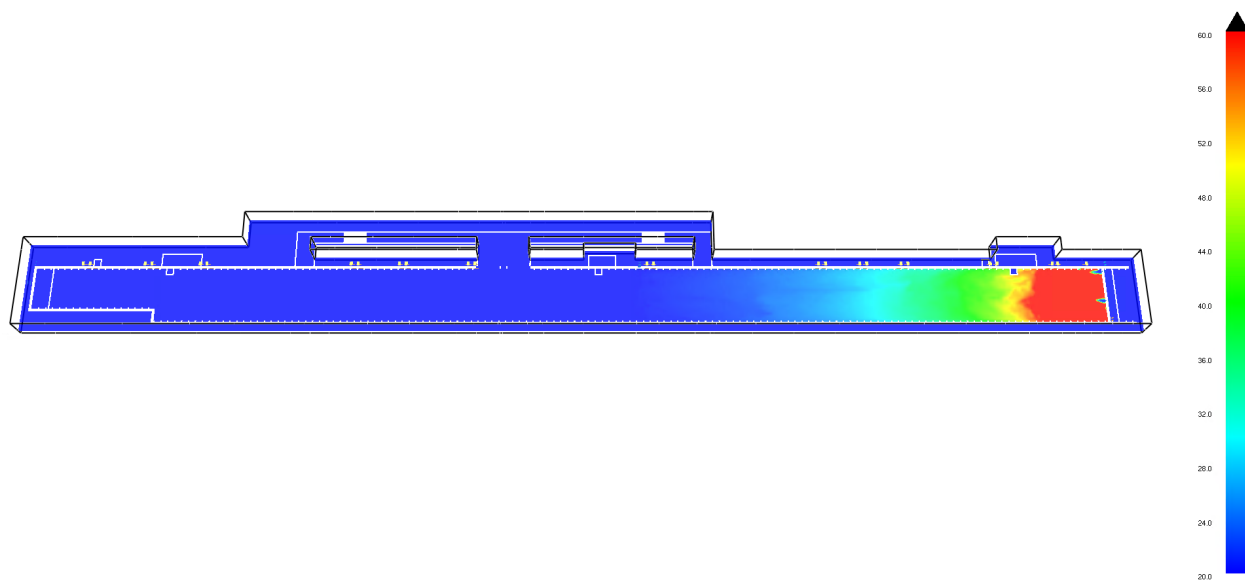


Figura 61- Temperatura al soterrani PS-4 pla Z=1,8 m, a t= 10 minuts

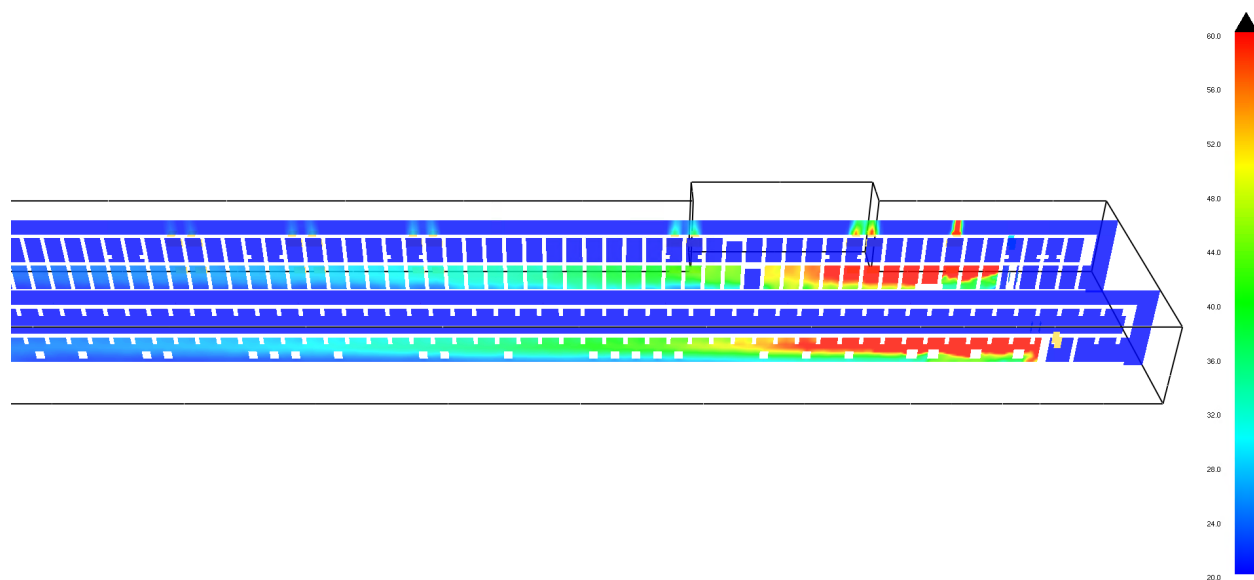


Figura 62- Temperatura als talls longitudinals CL1 i CL2 a $t=10$ minuts

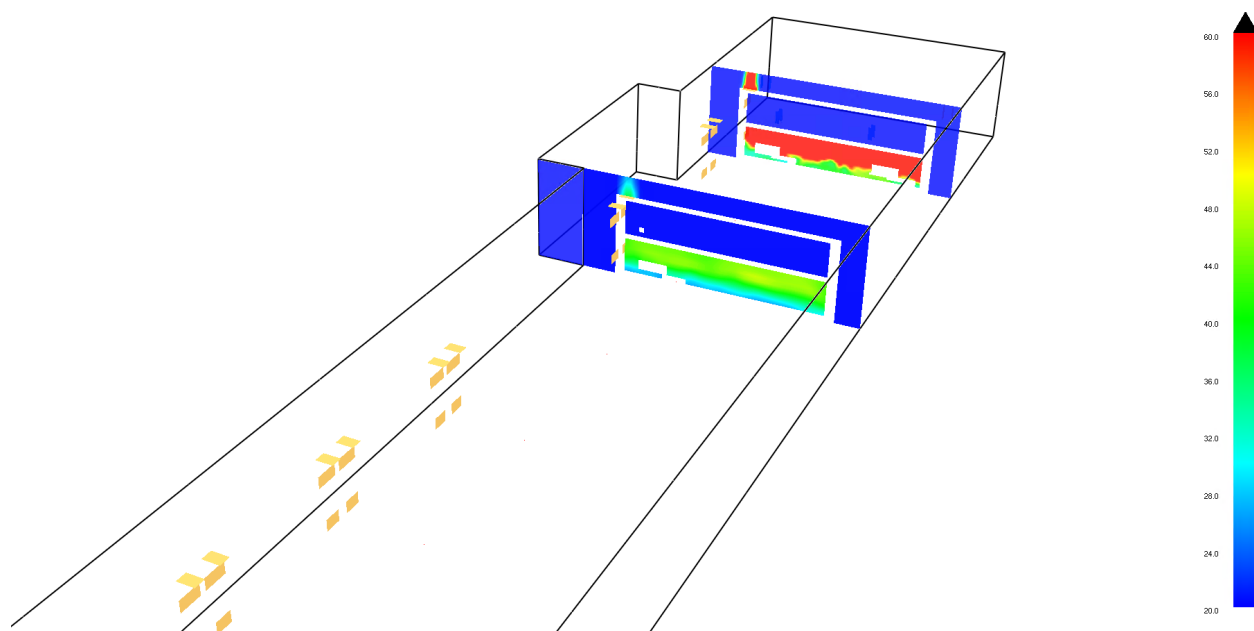


Figura 63 - Temperatura als talls transversals CT4 i CT5 a $t=10$ minuts

El moment en què hi ha una major àrea a temperatures elevades coincideix amb el pic de l'incendi, al voltant dels 15 minuts de l'inici (Figura 64, Figura 65, Figura 66). Tot i així aquesta àrea afectada seria d'uns 20 m de radi al voltant de l'incendi.

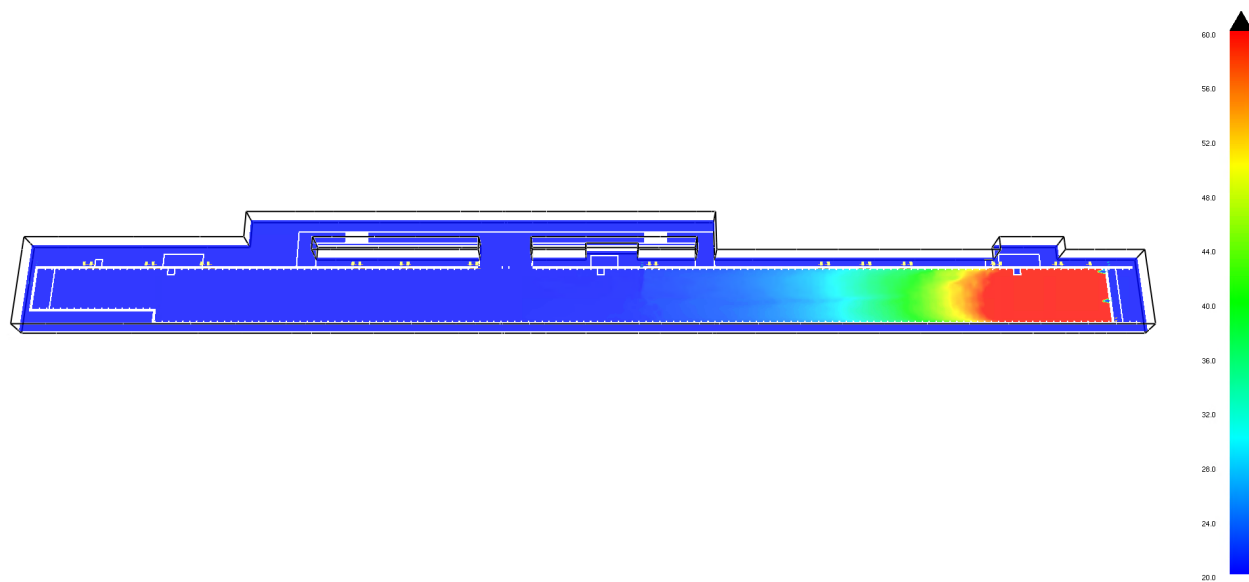


Figura 64 - Temperatura al soterrani PS-4 al pla Z=1,8 m, a t= 15 minuts

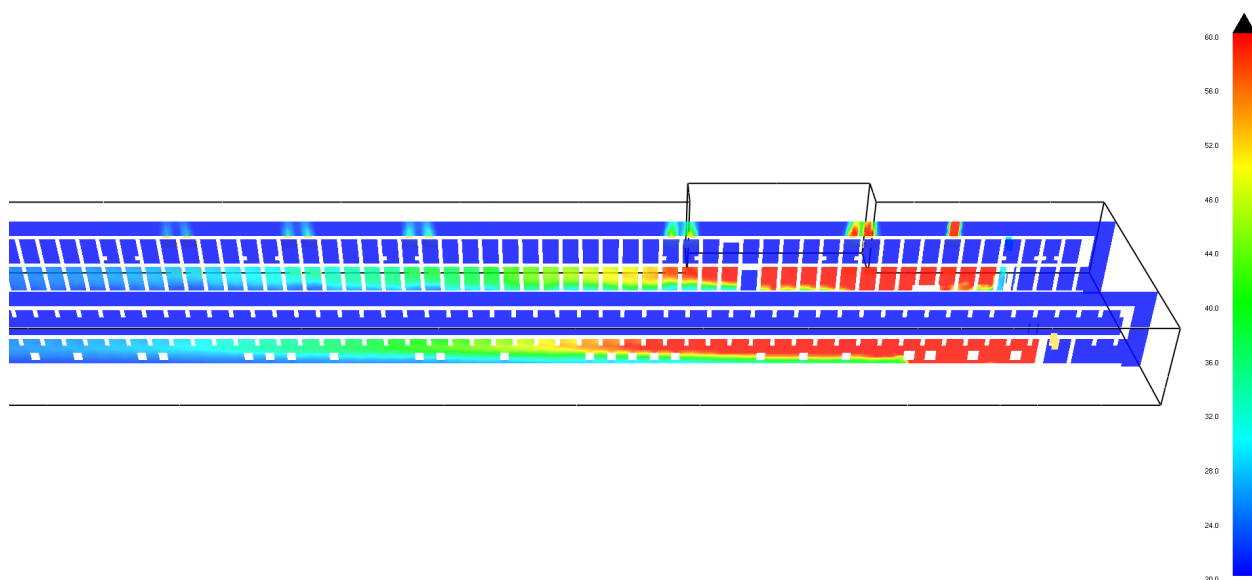


Figura 65 - Temperatura als talls longitudinals CL1 i CL2 a t= 15 minuts

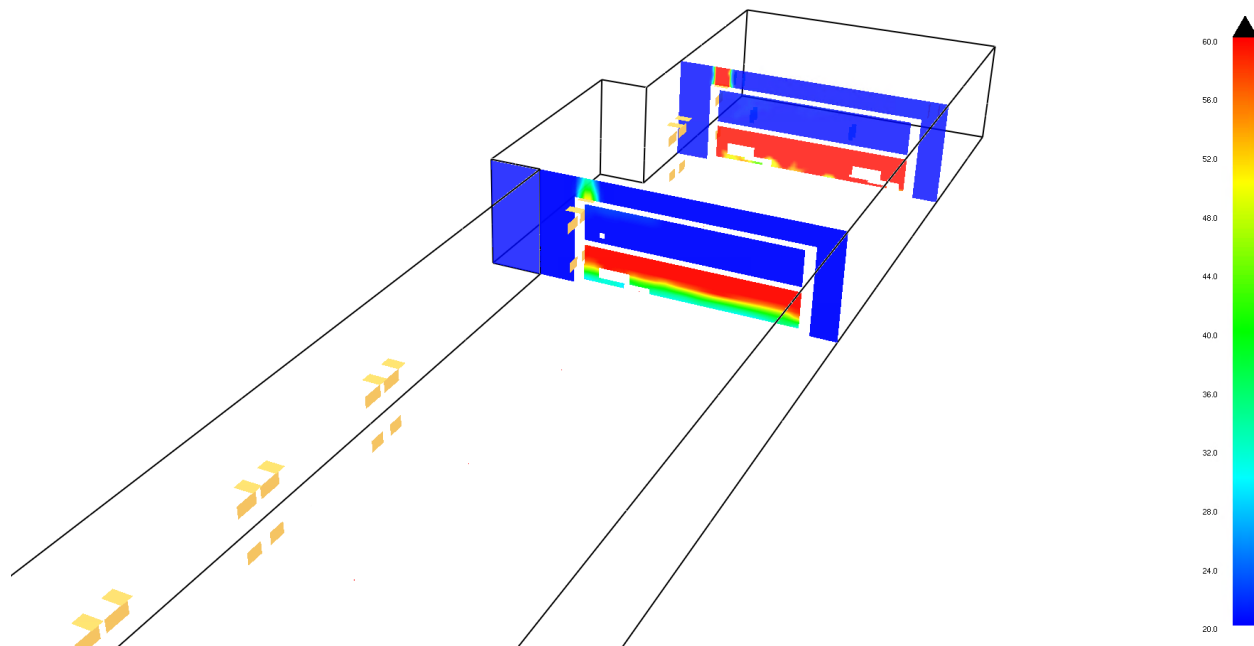


Figura 66 - Temperatura als talls transversals CT4 i CT5 a t= 15 minuts

A partir dels 15 minuts la temperatura comença a disminuir progressivament i quan s'arriba als 30 minuts (Figura 67) la temperatura clarament ha disminuït en la zona de l'incendi on de forma mitjana ja no supera els 32 °C a una altura de 1,8 m. Tot i així, es pot veure com en les zones superiors (Figura 68 i Figura 69) la temperatura encara està en alguns punts al voltant dels 60 °C.

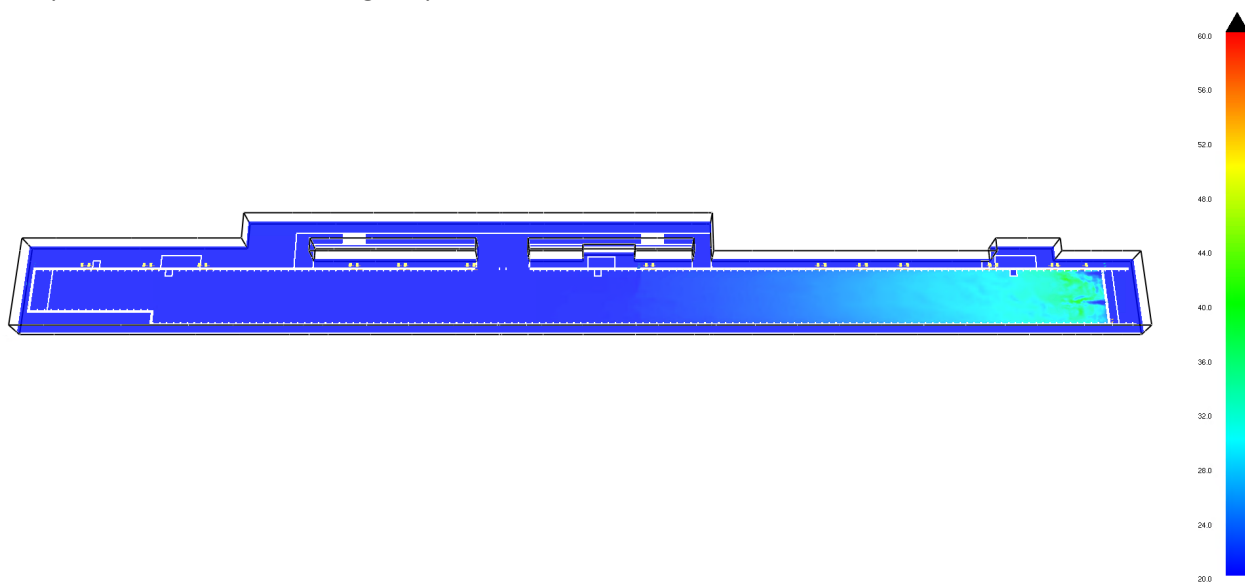


Figura 67 - Temperatura al soterrani PS-4 al pla Z=1,8 m, a t= 30 minuts

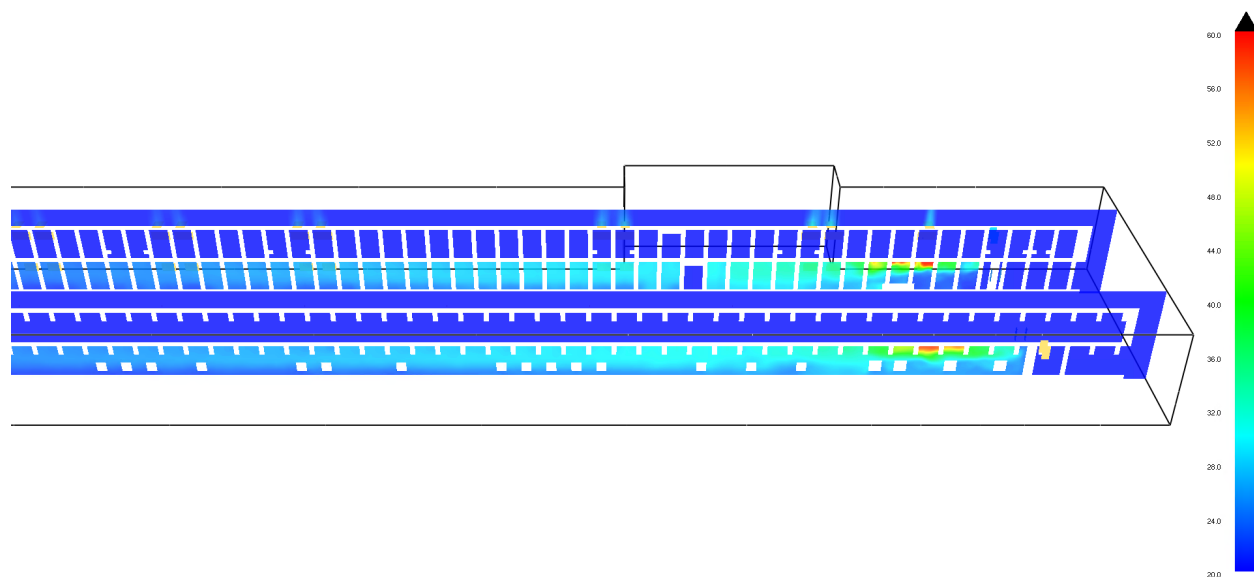


Figura 68 - Temperatura als talls longitudinals CL1 i CL2 a t= 30 minuts

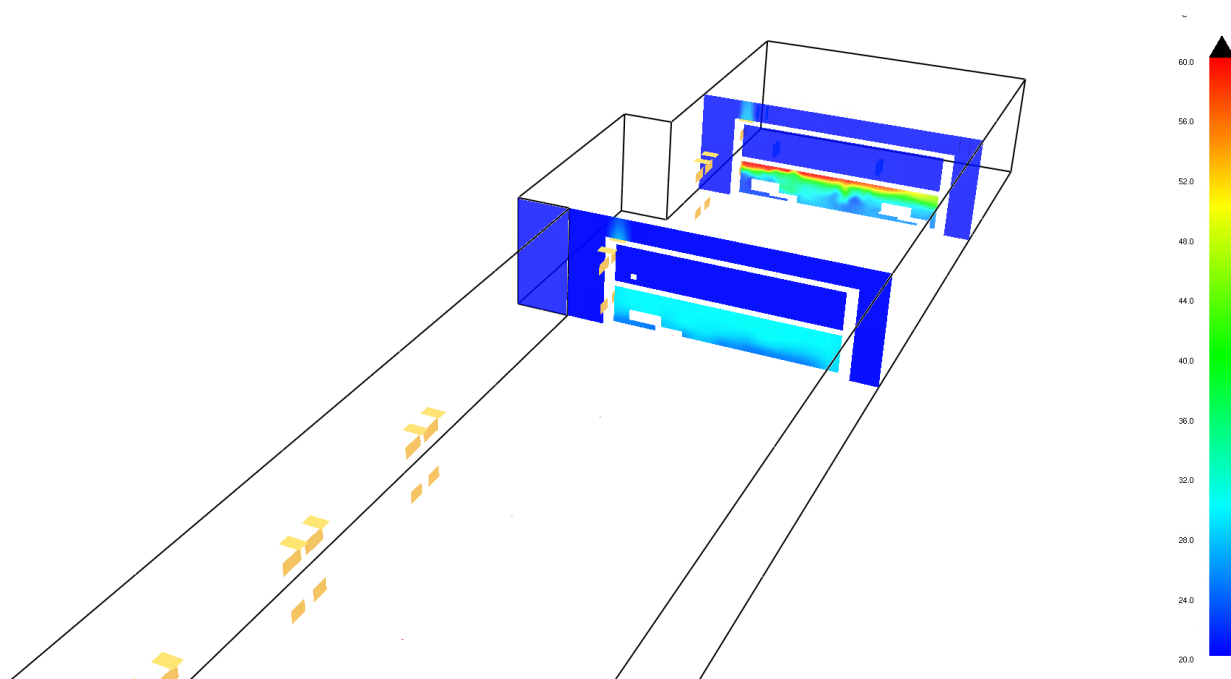


Figura 69 - Temperatura als talls transversals CT4 i CT5 a t= 30 minuts

5.5 Concentració d'oxigen

Novament, la concentració d'oxigen és un paràmetre que està relacionat amb la concentració del fum [Bombers de la Generalitat de Catalunya, 2017] estableix com a criteri d'acceptació un valor superior al 18% en volum a una altura de 1,8 metres en els recorreguts d'evacuació amb la finalitat de garantir unes condicions segures pels ocupants. A continuació, la Figura 70 mostra la concentració d'oxigen al moment inicial de la simulació, corresponent al valor normal de l'aire del 21% en volum.

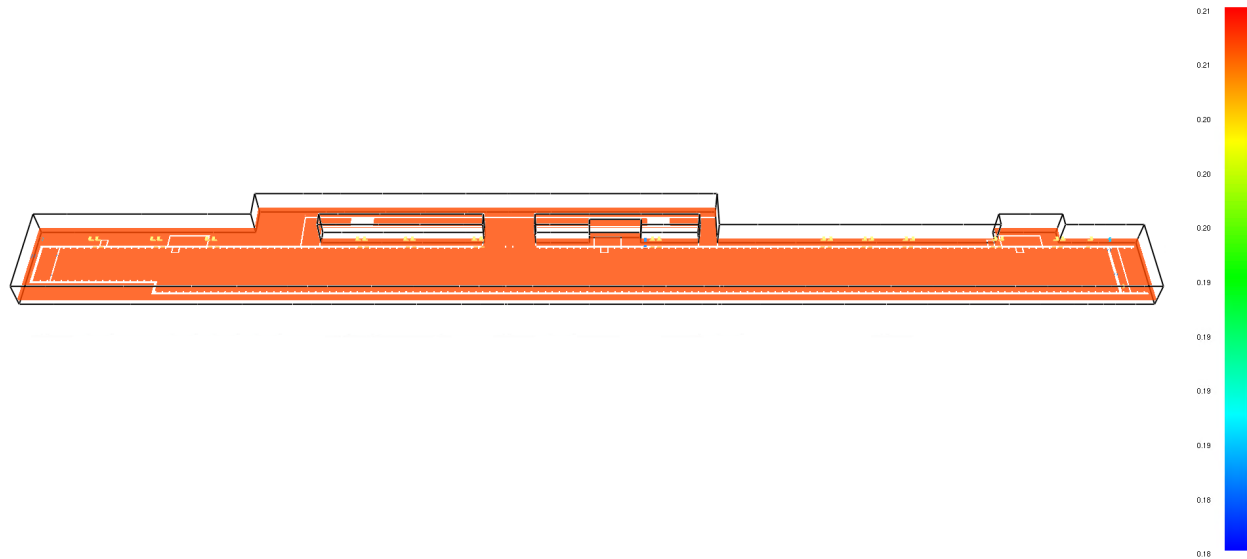


Figura 70 - Concentració d'oxigen al soterrani PS-4 al pla Z=1,8 m, moment inicial

Durant els deu primers minuts (Figura 71, Figura 72, Figura 73), la concentració d'oxigen només baixa per sota del llindar admissible en la zona propera a l'incendi, per tant en aquest assentit es garanteix l'evacuació dels ocupants pel que fa a la concentració d'oxigen.

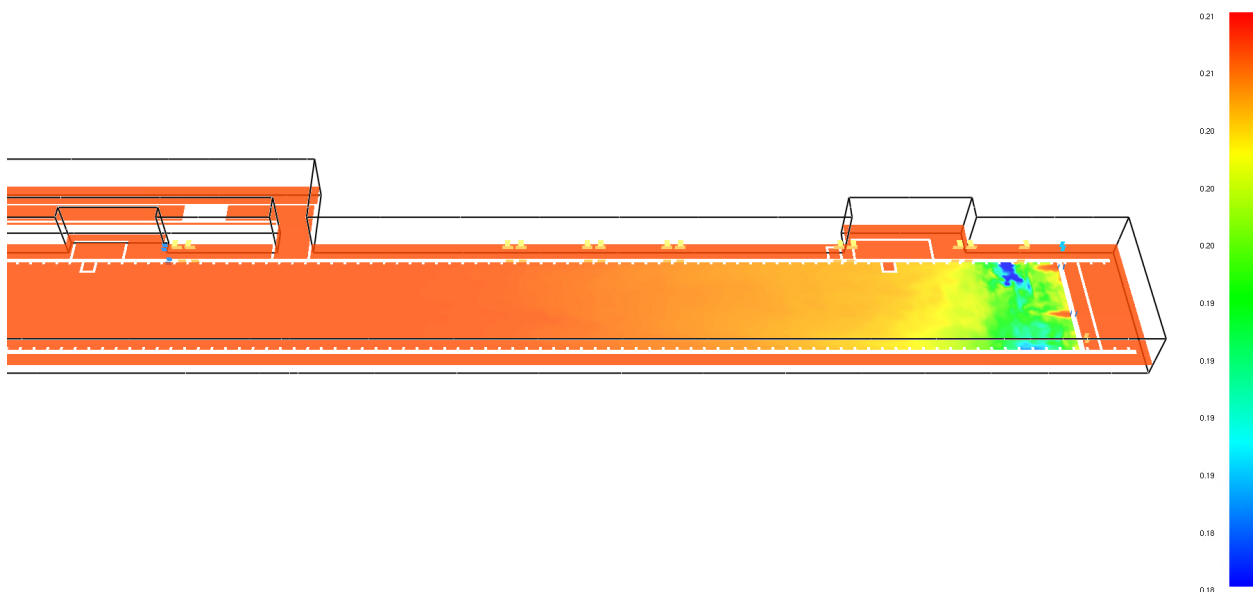


Figura 71 - Concentració d'oxigen al soterrani PS-4, all pla Z=1,8 m a t= 5 minuts

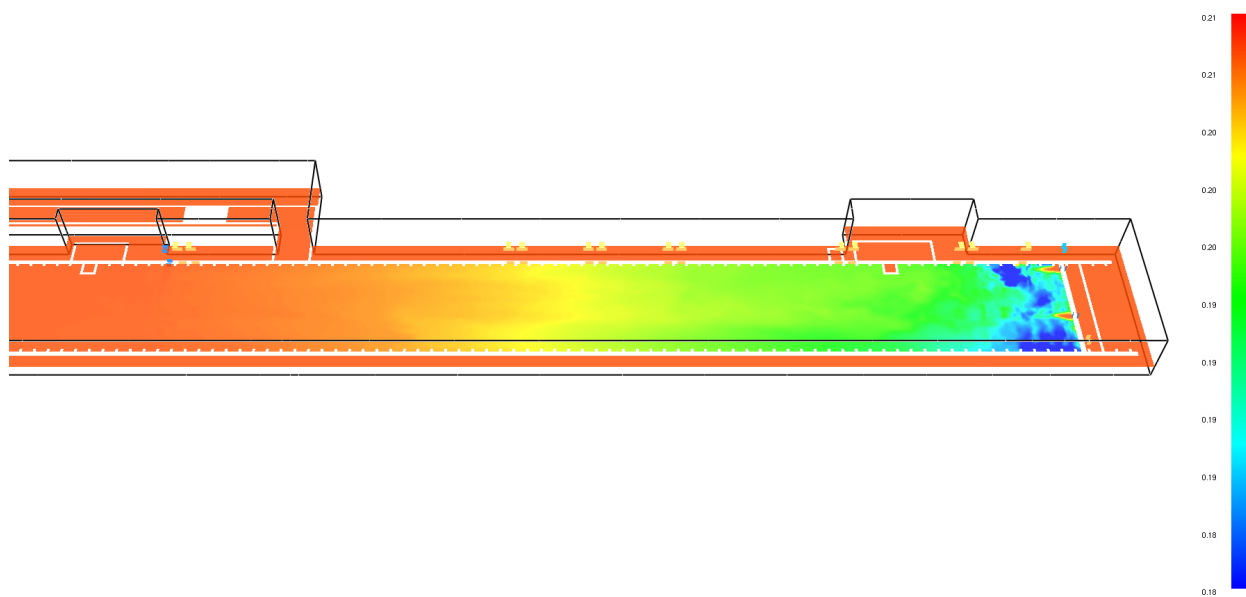


Figura 72 - Concentració d'oxigen al soterrani PS-4 al pla Z=1,8 m, a t= 10 minuts

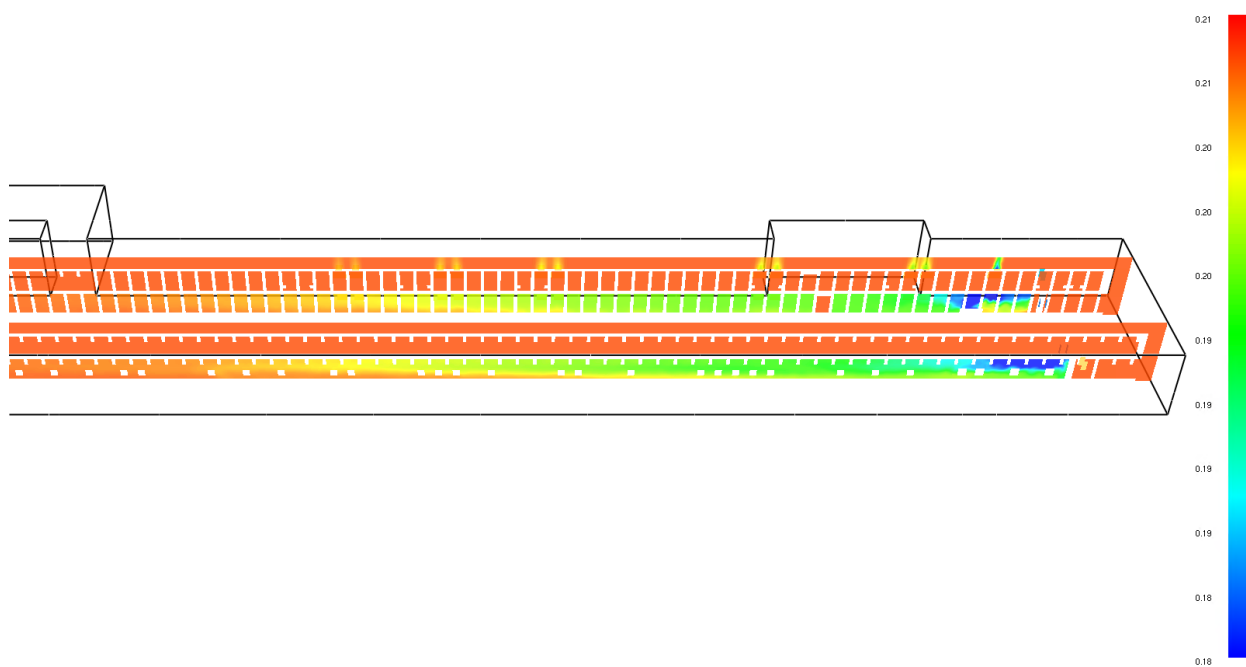


Figura 73 - Concentració d'oxigen als talls longitudinals CL1 i CL2 a t= 20 minuts

No obstant es pot observar com al cap de 15 minuts, coincidint aproximadament amb el pic de l'incendi, la concentració d'oxigen a 1,8 m d'altura està per sota del 18% en volum en una zona més àmplia que cobreix bona part de la zona mar.

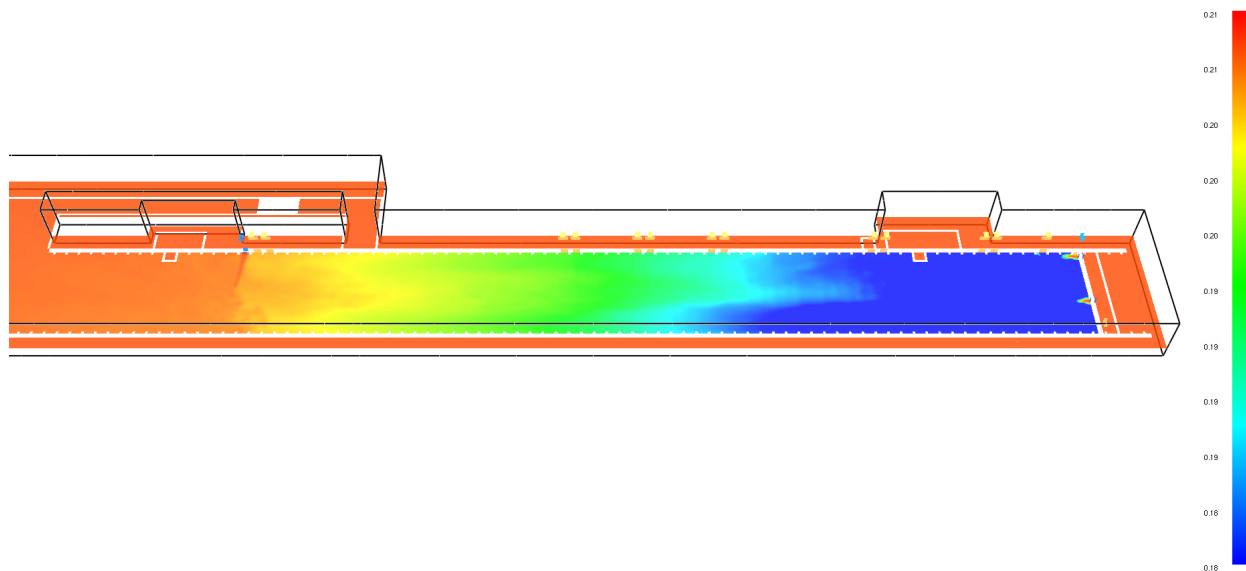


Figura 74 - Concentració d'oxigen al soterrani PS-4, al pla Z=1,8 m, a t= 15 minuts

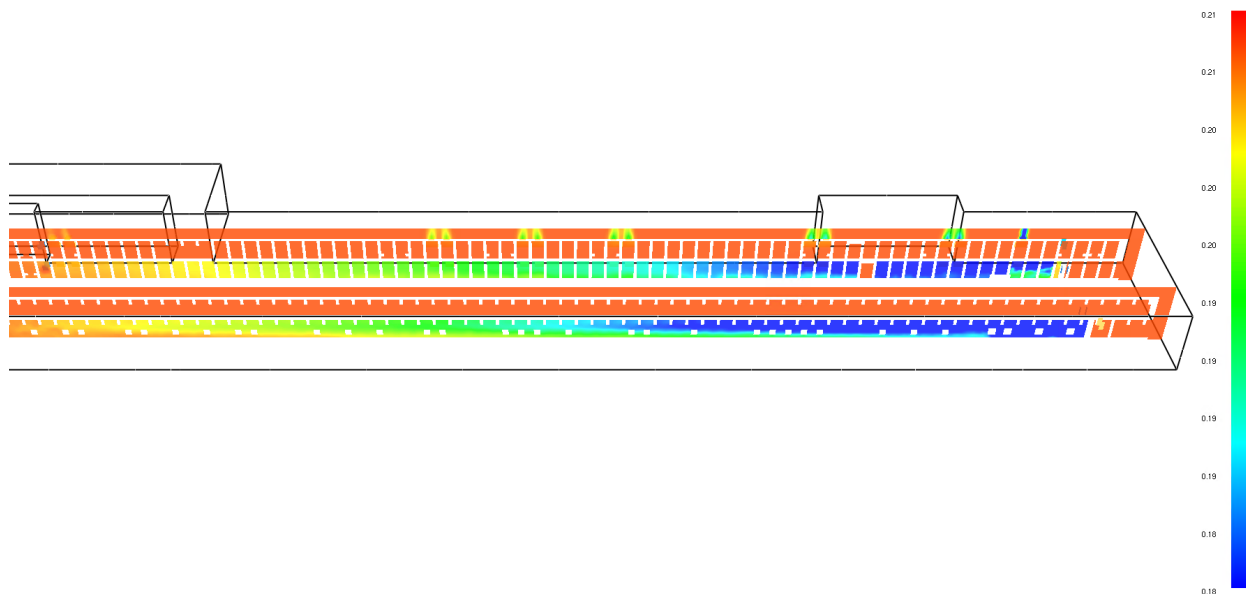


Figura 75 - Concentració d'oxigen als talls longitudinals CL1 i CL2 a t= 15 minuts

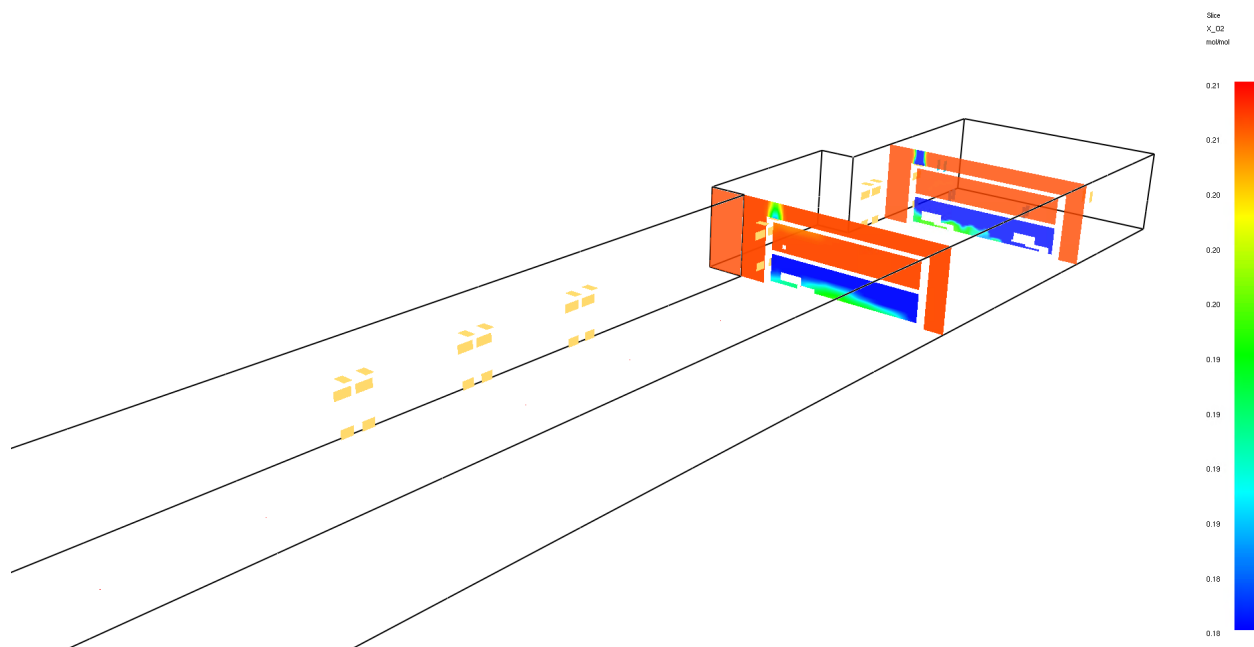


Figura 76 - Concentració d'oxigen als talls transversals CT4 i CT5 a t= 15 minuts

A partir dels 15 minuts la concentració d'oxigen comença a augmentar altra vegada ja que l'incendi està en fase de decreixement. Al cap de 30 minuts la concentració a tot el soterrani PS4 ja està per sobre del 18 % en volum (Figura 77, Figura 78, Figura 79).

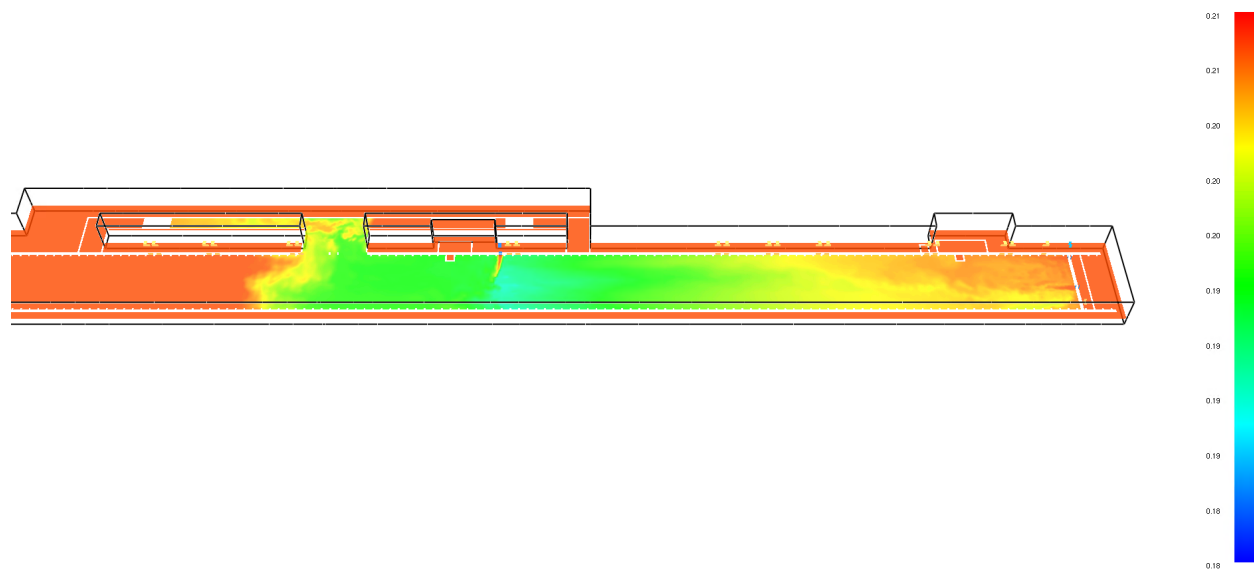


Figura 77 - Concentració d'oxigen al soterrani PS-4 al pla Z=1,8 m, a t= 30 minuts

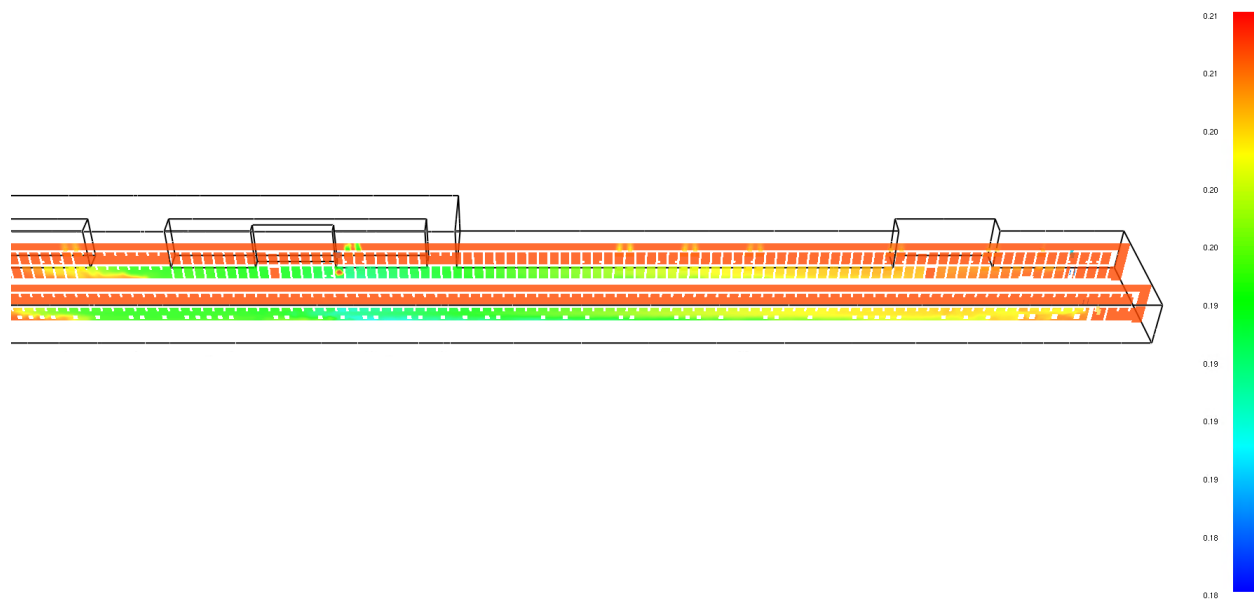


Figura 78 - Concentració d'oxigen als talls longitudinals CL1 i CL2 a t= 30 minuts

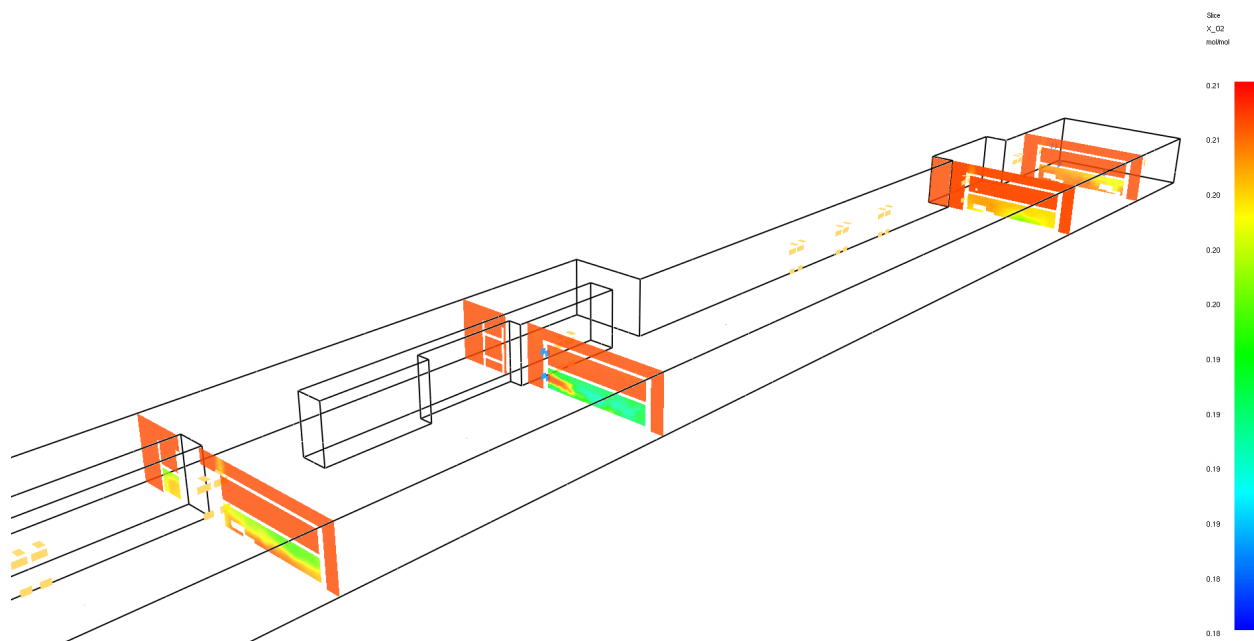


Figura 79 - Concentració d'oxigen als talls transversals CT2, CT3, CT4 i CT5 a t= 30 minuts

5.6 Concentració de CO

Segons la normativa [Bombers de la Generalitat de Catalunya, 2017] s'estableix com a criteri d'acceptació que la concentració de CO no superi els 150 ppm ($1,5 \cdot 10^{-4}$ mol/mol) durant la fase d'evacuació. Malgrat que a l'aparcament hi ha de forma habitual una concentració mitjana basal de CO d'uns 4 ppm, no s'ha tingut en compte a la simulació ja que al ser un valor força baix no tindria una influència significativa en els resultats obtinguts. En aquest cas durant els 5 primers minuts es pot dir que aquest criteri es compleix (Figura 80 i Figura 81), però no entre els 5 i els 10 minuts (Figura 82 i Figura 83), en què la zona en què es supera aquest llindar supera el radi de 10 m al voltant de l'incendi.

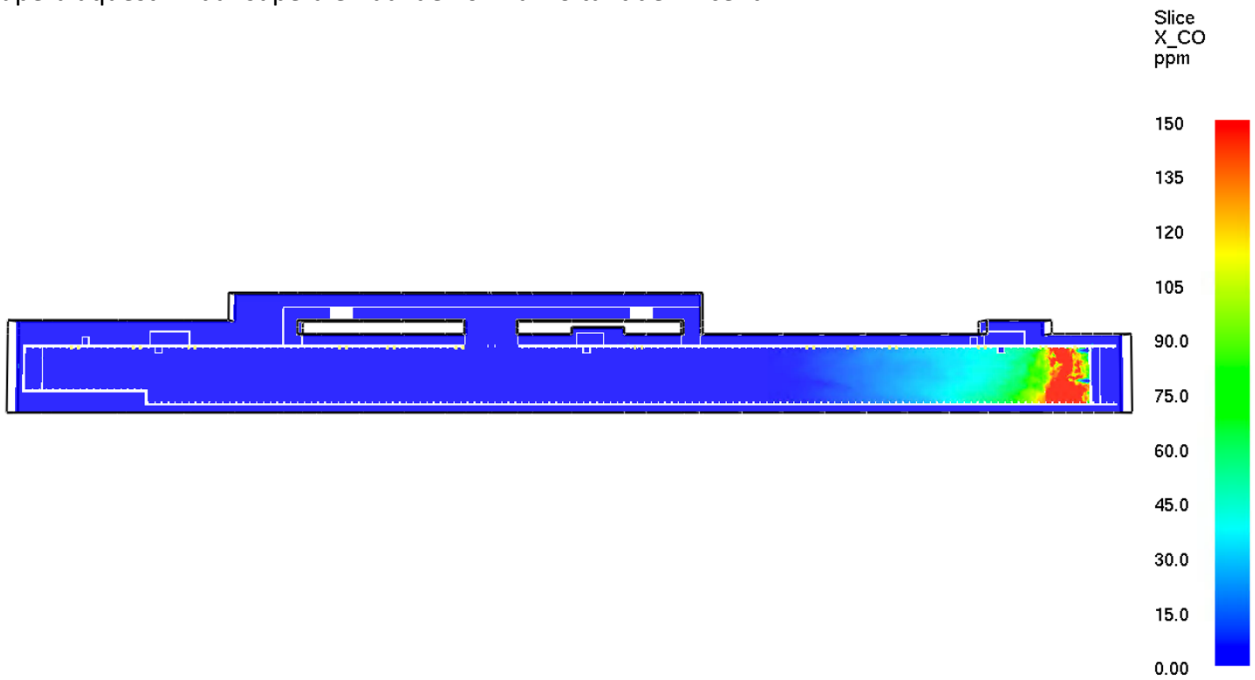


Figura 80 - Concentració de CO al soterrani PS-4 al pla Z=1,8 m, a t= 5 minuts

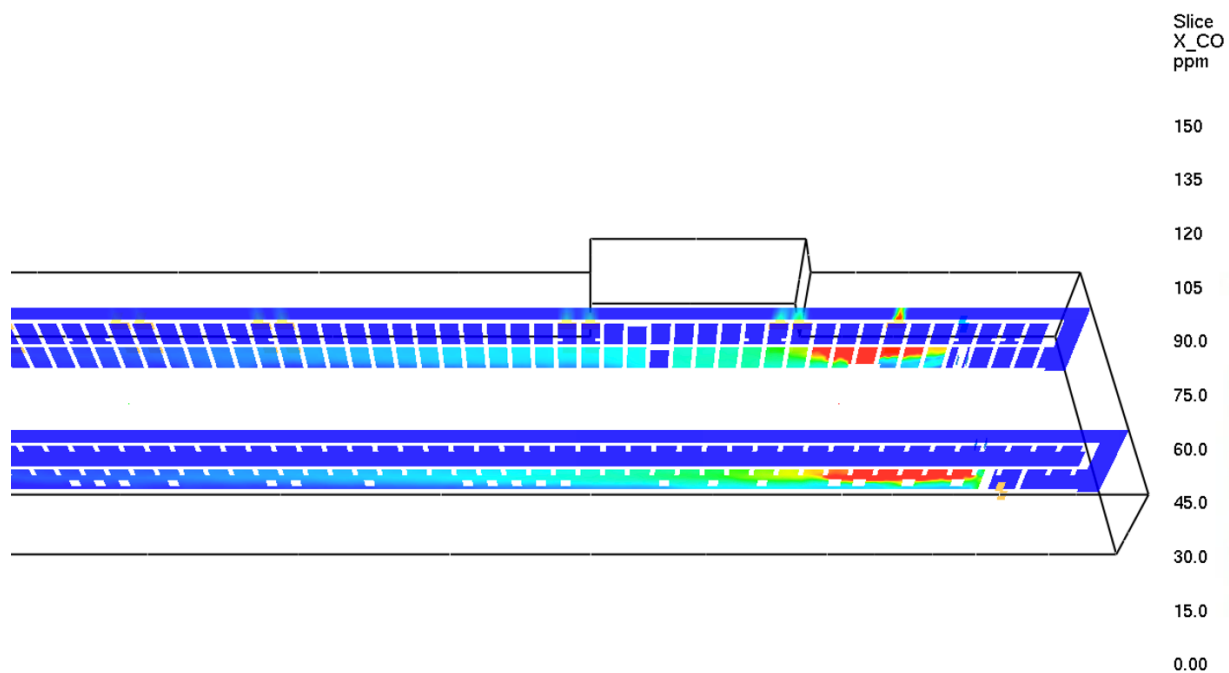


Figura 81- Concentració de CO als talls longitudinals CL1 i CL2 a $t=5$ minuts

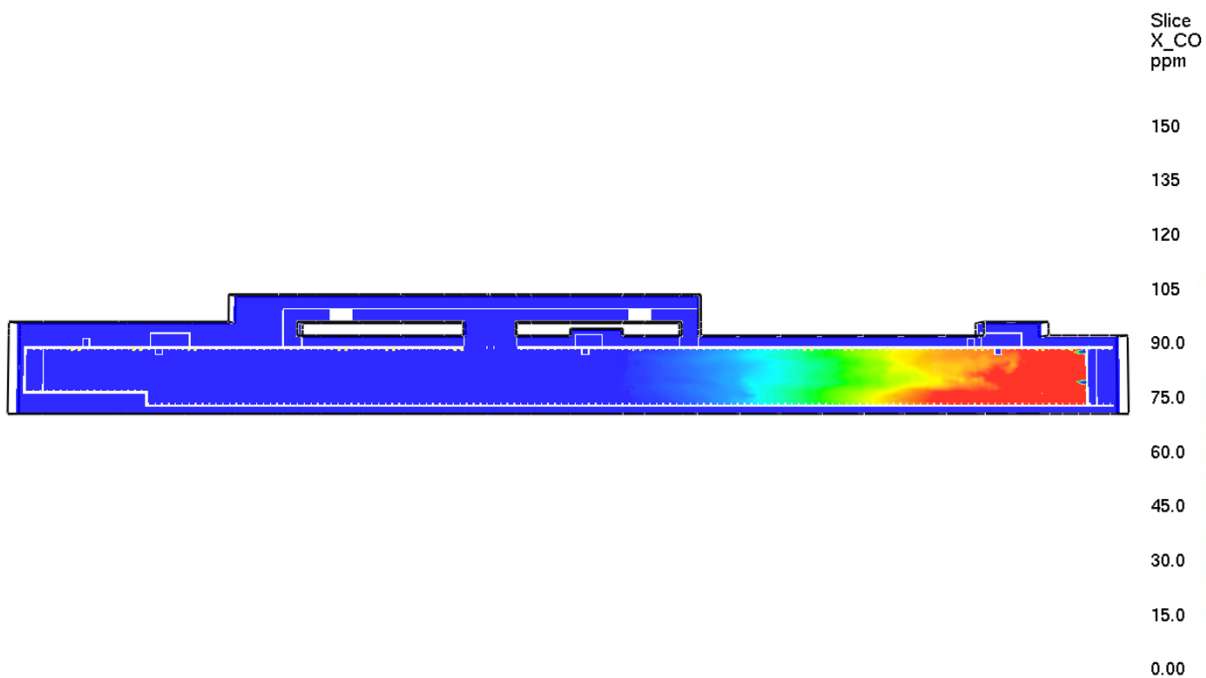


Figura 82 - Concentració de CO al soterrani PS-4 al pla $Z=1.8$ m, a $t=10$ minuts

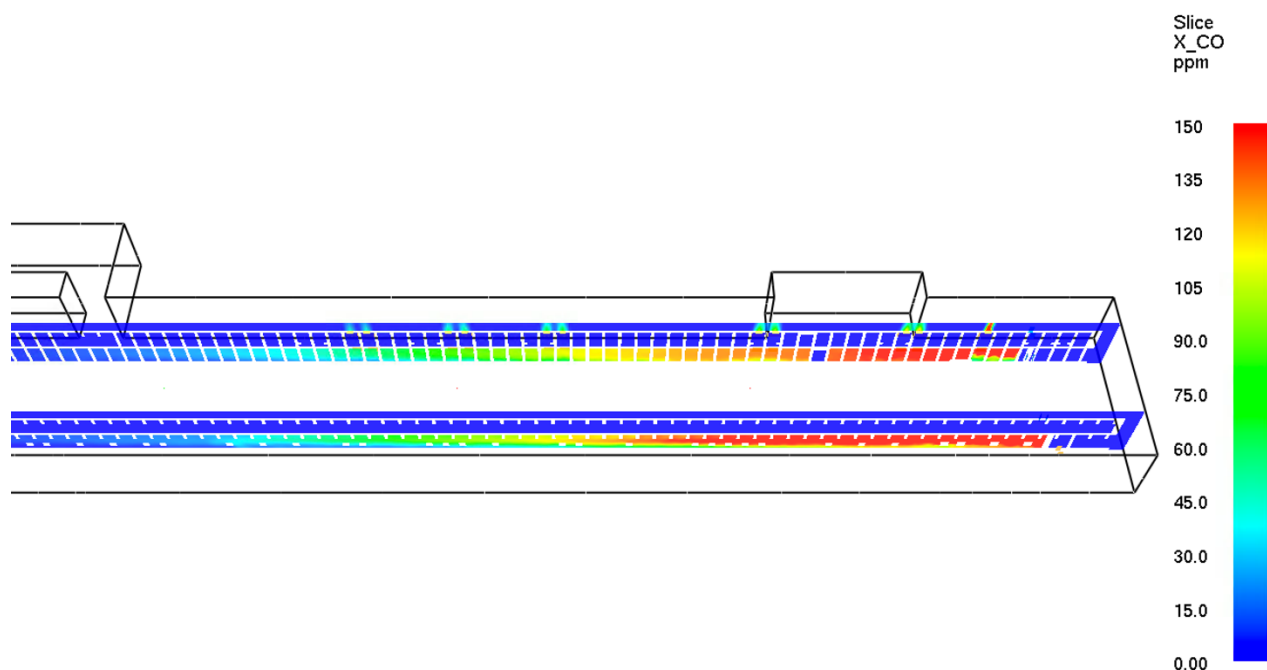


Figura 83- Concentració de CO als talls longitudinals CL1 i CL2 a $t = 10$ minuts

A partir dels 10 minuts, l'àrea en què la concentració de CO supera el valor llindar va augmentant progressivament fins aproximadament els 30 minuts, en què ja arriba a la rampa, tot i que en aquest moment la concentració de CO a la posició de l'incendi ja torna a disminuir (Figura 84 i Figura 85).

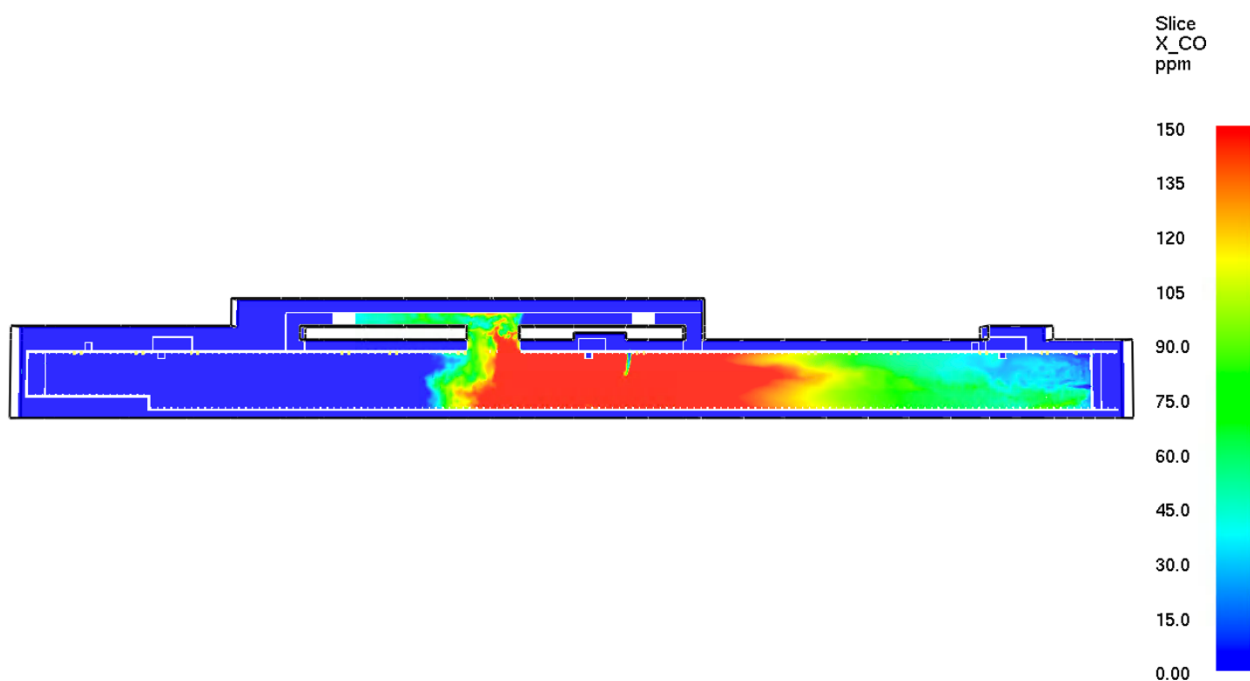


Figura 84 - Concentració de CO al soterrani PS-4 al pla $Z = 1,8$ m, a $t = 30$ minuts

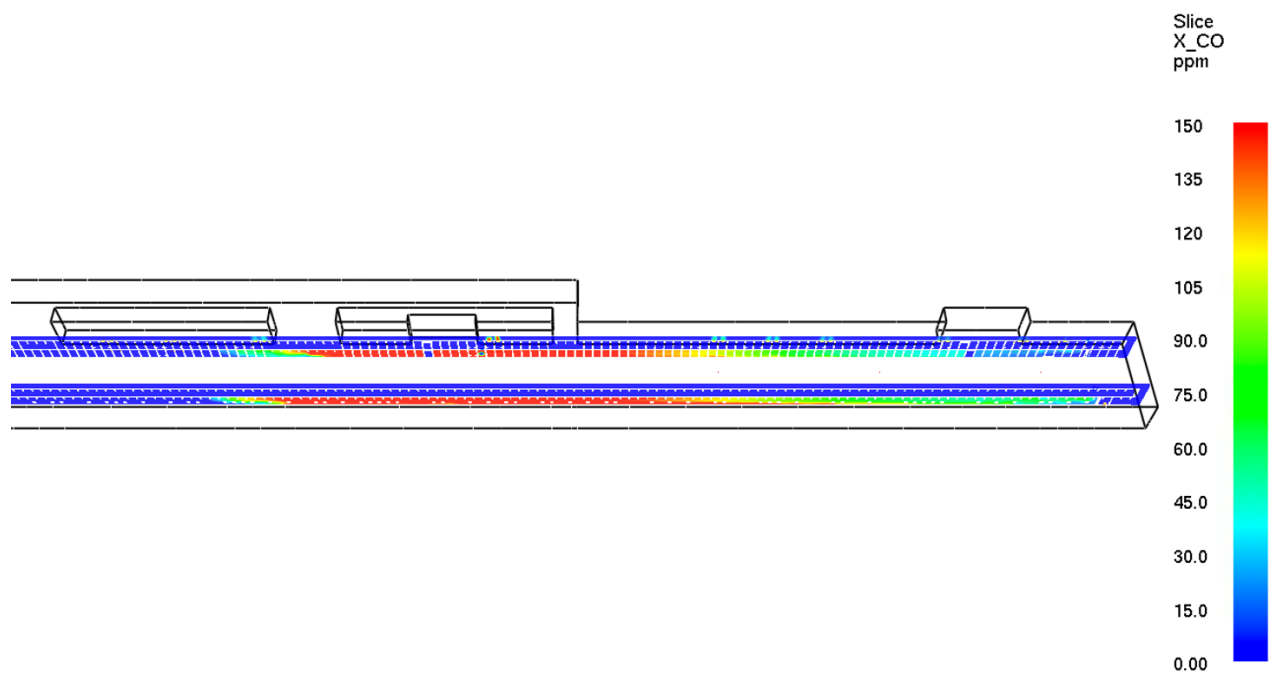


Figura 85- Concentració de CO als talls longitudinals CL1 i CL2 a t= 30 minuts

Al cap de 43 minuts ja no s'observa cap zona ni del soterrani PS-4 ni del soterrani PS-3 ni de la rampa amb valors que superin el llindar de CO (Figura 86, Figura 87 i Figura 88).

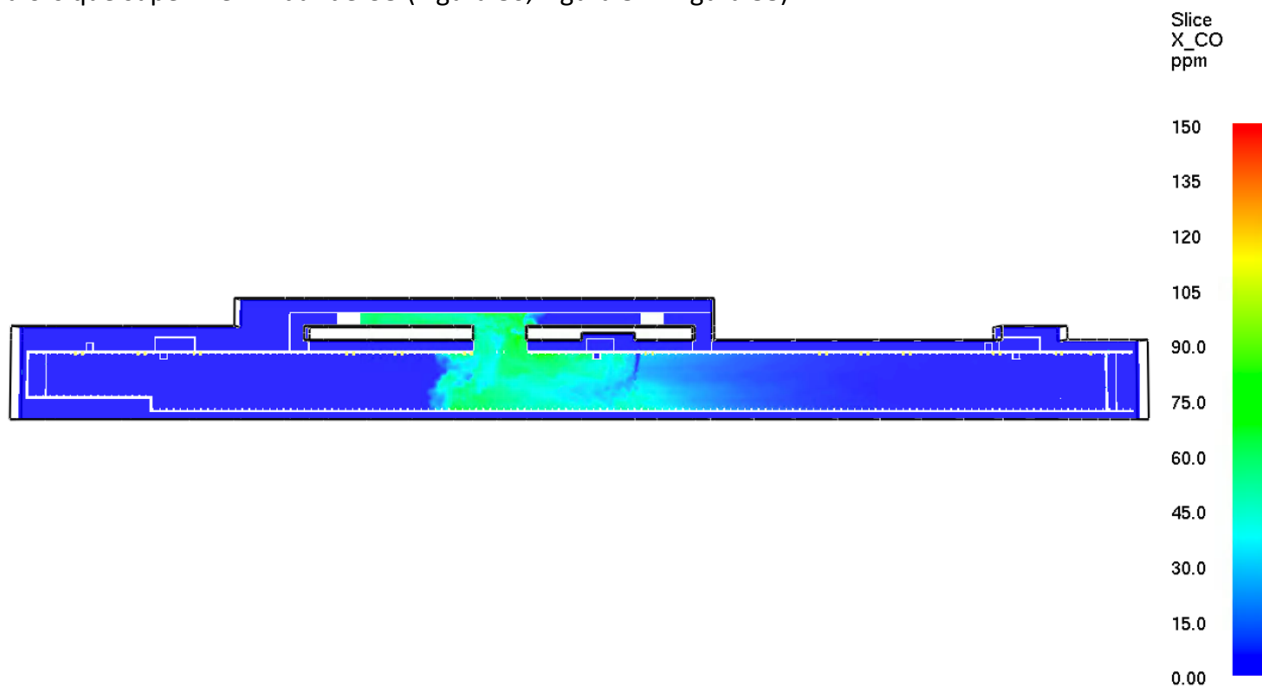


Figura 86 - Concentració de CO al soterrani PS-4 al pla Z=1,8 m, a t= 43 minuts

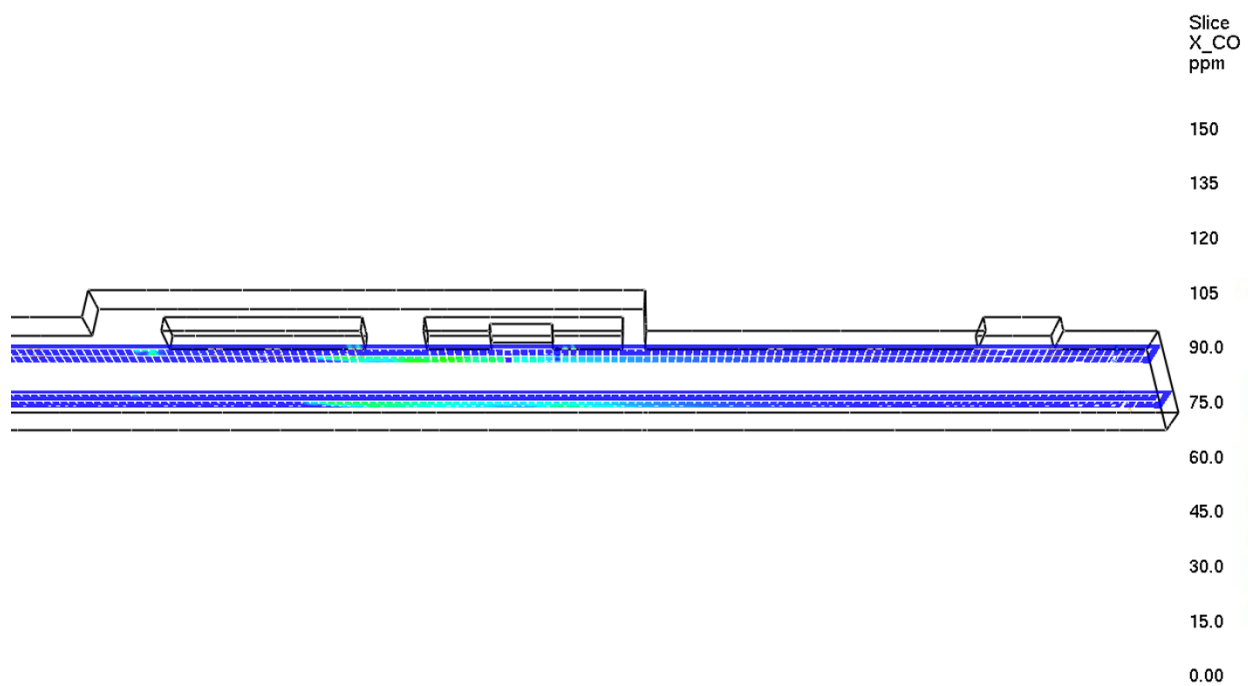


Figura 87- Concentració de CO als talls longitudinals CL1 i CL2 a t= 43 minuts

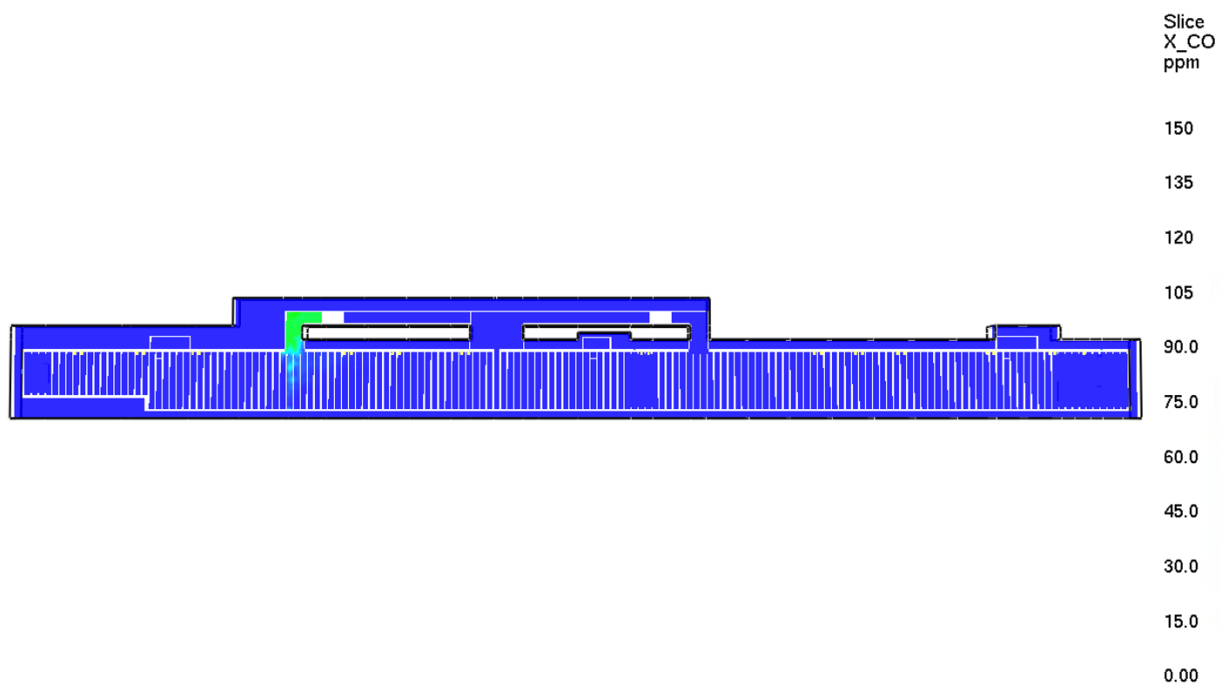


Figura 88 - Concentració de CO al soterrani PS-3 al pla Z=5,2 m (altura 1,8 m respecte el terra), a t= 43 minuts

5.7 Concentració de CO₂

[Bombers de la Generalitat de Catalunya, 2017] estableix com a criteri d'acceptació un valor inferior a 0,03 mol/mol de CO₂ a una altura de 1,8 metres en els recorreguts d'evacuació amb la finalitat de garantir unes condicions segures pels ocupants. En aquest cas, el llindar no s'assoleix en cap moment durant els 10 primers minuts que és quan tindria lloc l'evacuació (Figura 89 i Figura 90).

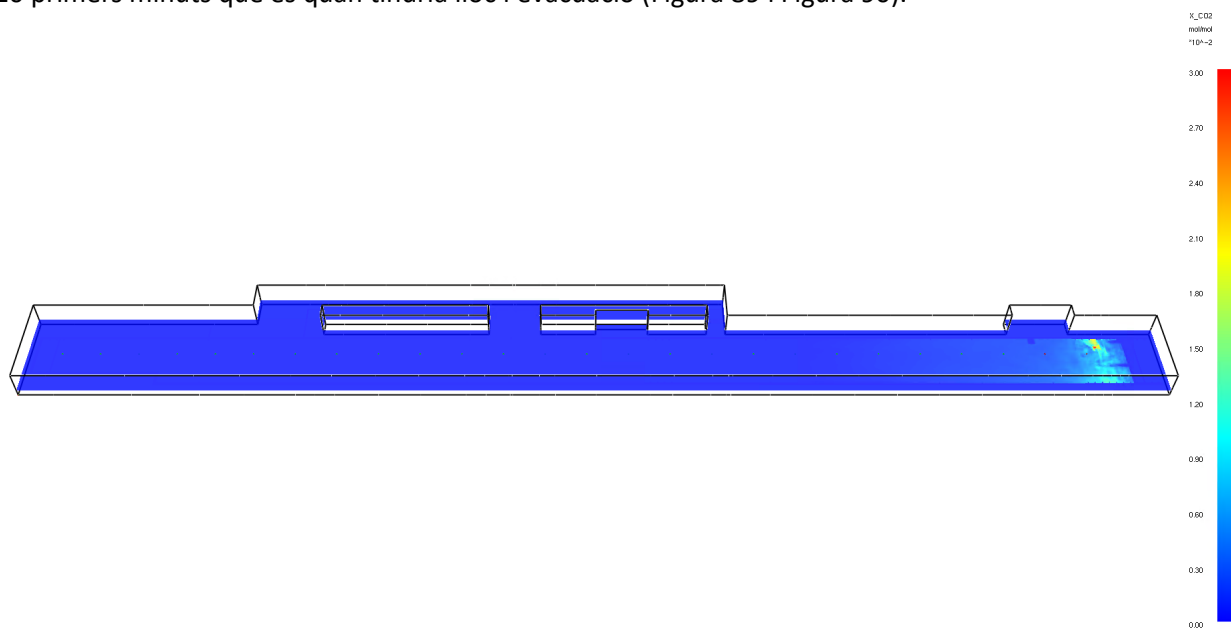


Figura 89 - Concentració de CO₂ al soterrani PS-4 al pla Z=1,8 m, a t= 5 minuts

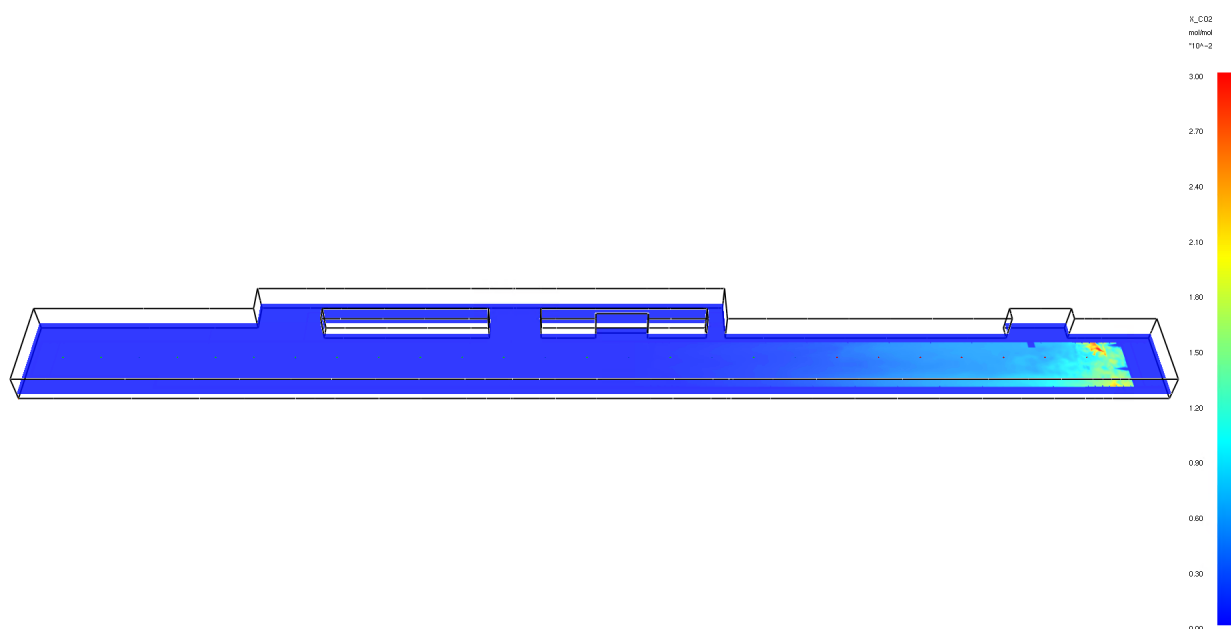


Figura 90 - Concentració de CO₂ al soterrani PS-4 al pla Z=1,8 m, a t= 10 minuts

La pitjor situació s'assoleix al cap de 15 minuts (Figura 91), però tot i així queda limitada a la zona propera a l'incendi. Es pot dir per tant que la concentració de CO₂ no suposa en cap moment un perill.

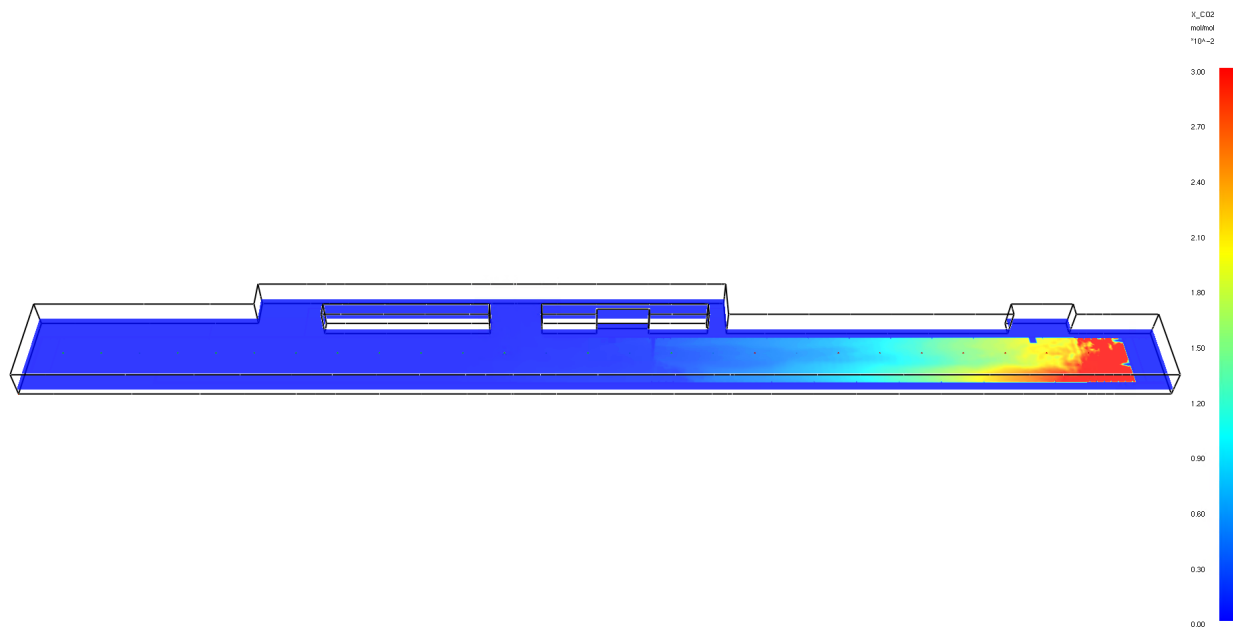


Figura 91 - Concentració de CO₂ al soterrani PS-4 al pla Z=1,8 m, a t= 15 minuts

Als 40 minuts ja pràcticament no hi ha presència de CO₂ (Figura 92).

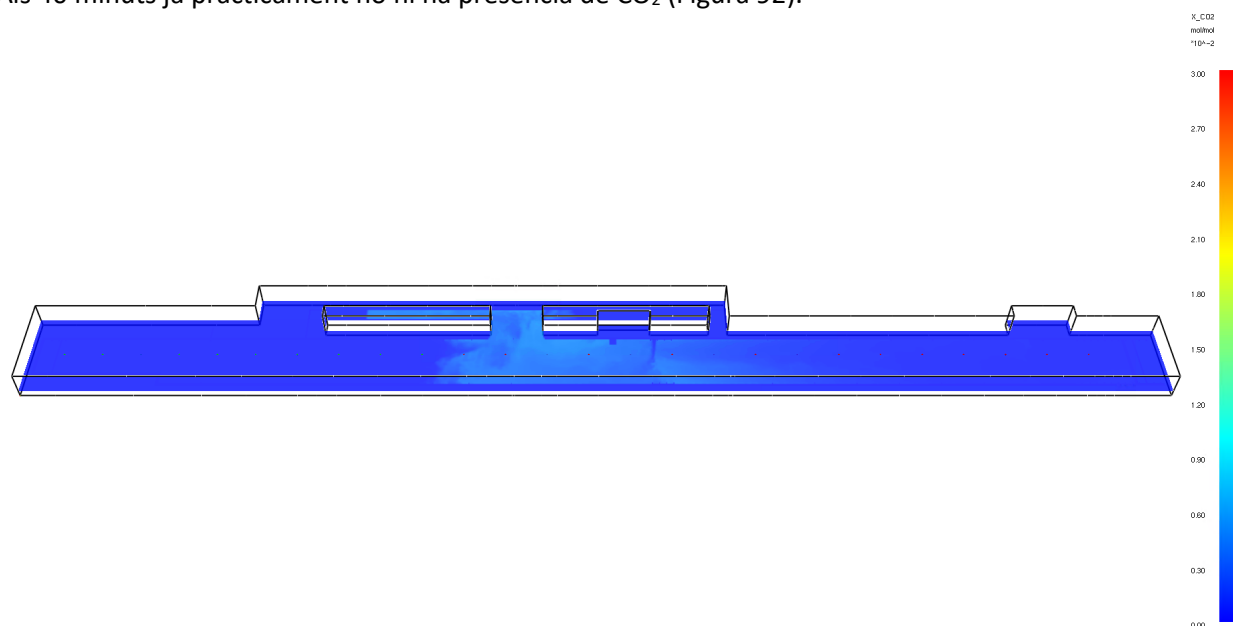


Figura 92 - Concentració de CO₂ al soterrani PS-4 al pla Z=1,8 m, a t= 40 minuts

6 Resultats de l'escenari B (salubritat diària al soterrani PS-4)

L'escenari de salubritat analitza la capacitat del sistema de ventilació existent per a renovar l'aire quan algun dels sensors de CO es dispara degut a què en alguna zona s'han assolit 50 ppm. En aquest cas s'ha delimitat una zona d'uns 200 m² on inicialment la concentració són 50 ppm i a la resta del soterrani PS-4 s'hi ha fixat una concentració inicial de 20 ppm, per les raons que ja s'han exposat a l'apartat 3.6. La Figura 93, mostra aquesta situació inicial.

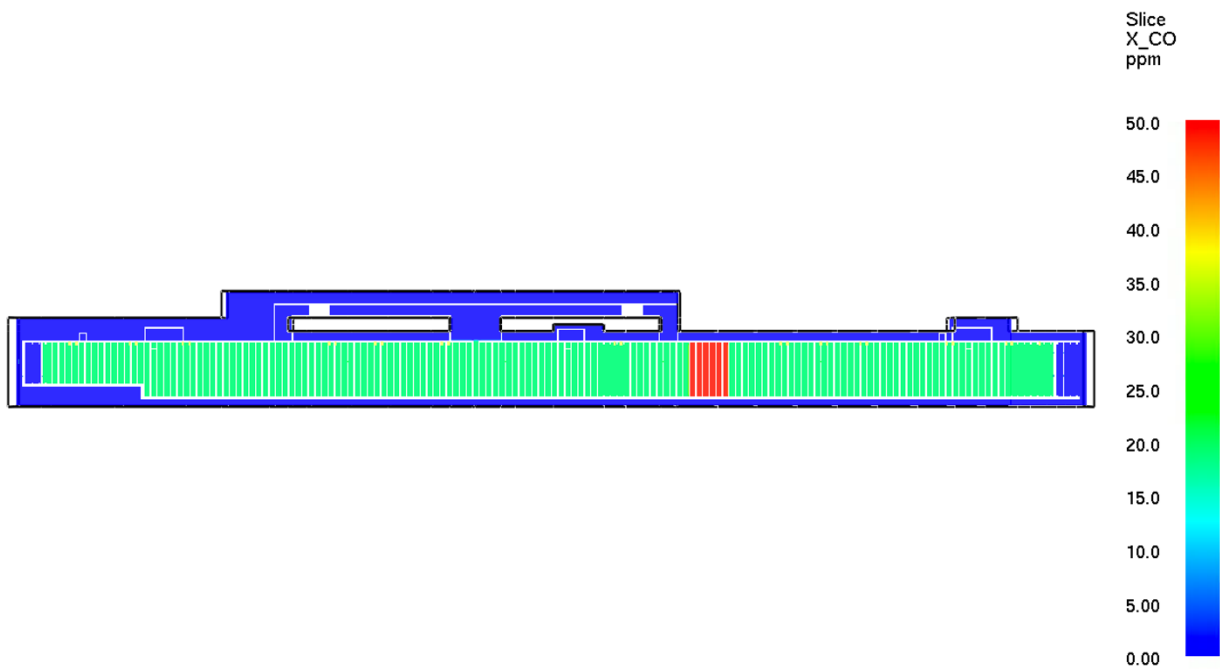


Figura 93 - Concentració de CO al soterrani PS-4 al pla Z=1,8 m, a l'instant inicial

En el moment que s'activa el sensor de CO (instant inicial) es posa en marxa la ventilació, la qual es manté fins que el sensor de la zona amb concentració elevada baixa per sota dels 49 ppm. Això té lloc al cap de 35,9 segons (Figura 94). A partir d'aquest moment el sistema de ventilació funciona 5 minuts més i a continuació s'atura.

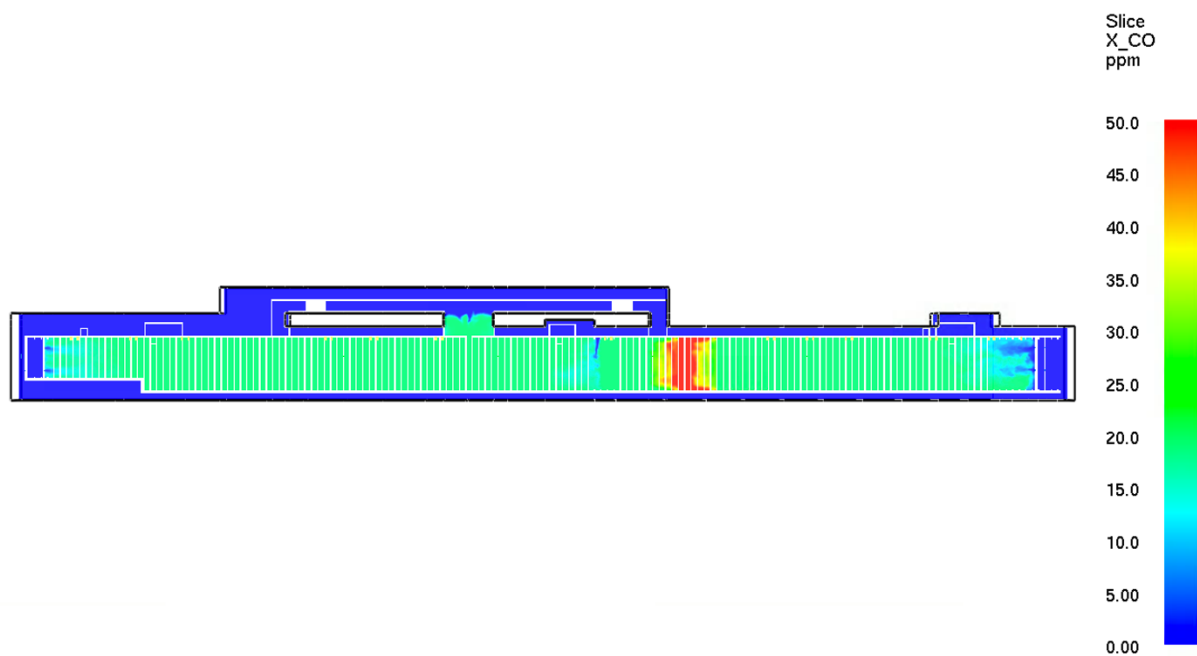


Figura 94 - Concentració de CO al soterrani PS-4 al pla Z=1,8 m, a l'instant en què es desactiva el sensor, $t=35,9s$

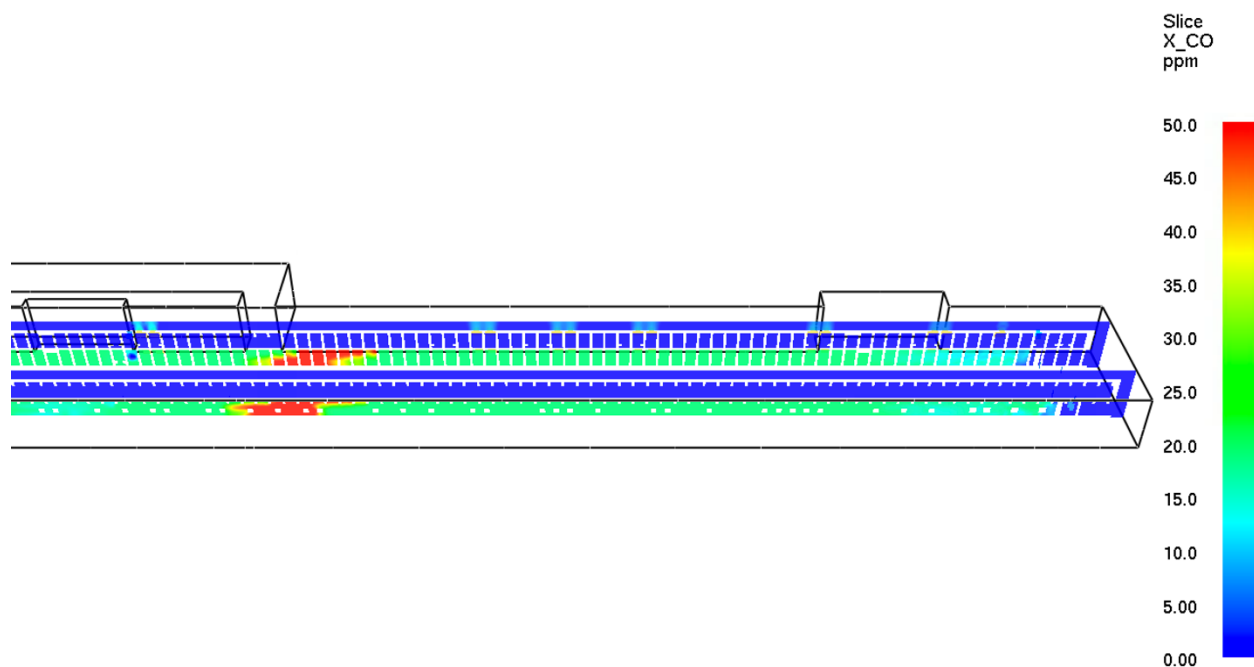


Figura 95 - Concentració de CO al soterrani PS-4 als plans longitudinals, a l'instant en que es desactiva el sensor, $t=35,9s$.

Al cap de 5 minuts s'atura la ventilació (concretament al segon 340), la concentració de CO en aquest moment es pot veure a la Figura 96 i la Figura 97. Es pot veure com la concentració de CO en les zones properes als ventiladors d'impulsió està clarament per sota dels 10 ppm però en la zona central i a la rampa la concentració encara es manté al voltant dels 20 ppm.

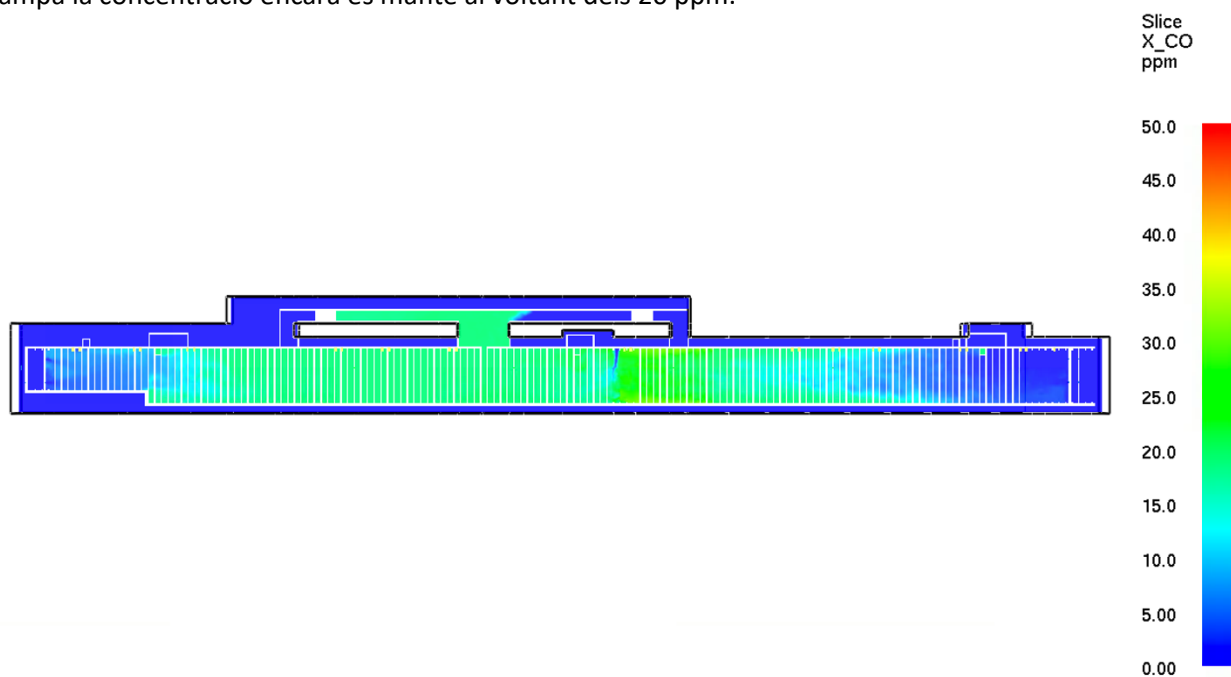


Figura 96 - Concentració de CO al soterrani PS-4 al pla Z=1,8 m, a l'instant en què s'atura la ventilació, $t=340$ s

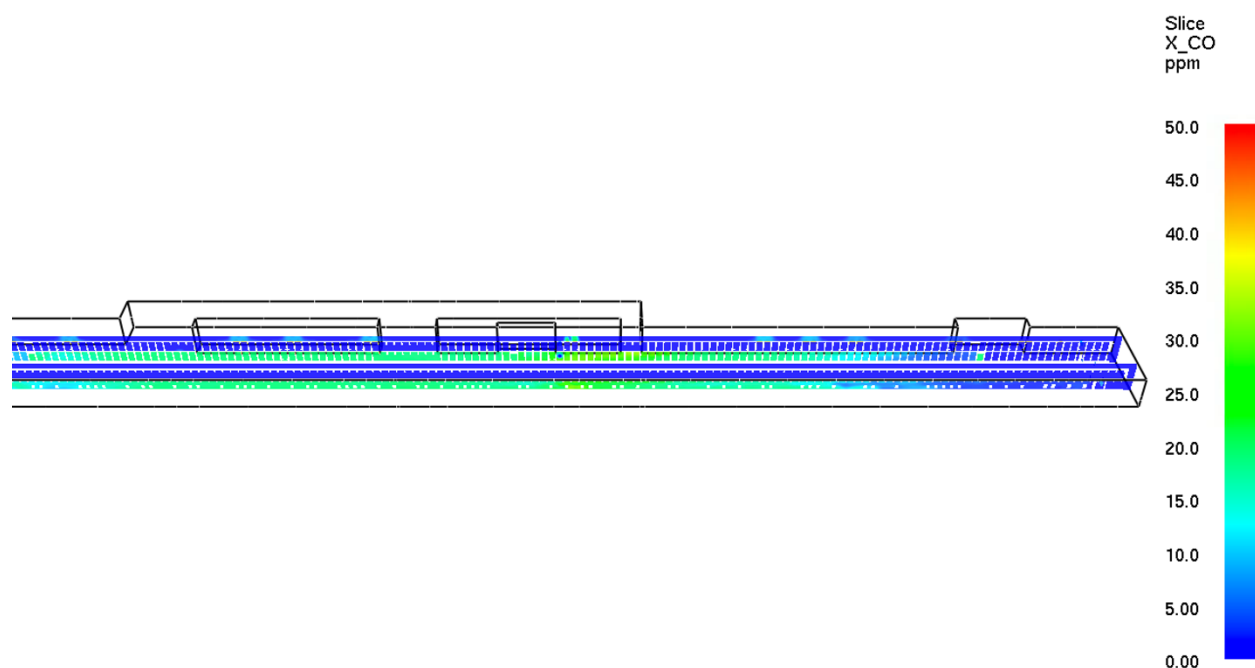


Figura 97 - Concentració de CO al soterrani PS-4 als plans longitudinals CL1 i CL2, a l'instant en que s'atura la ventilació, $t=340$ s

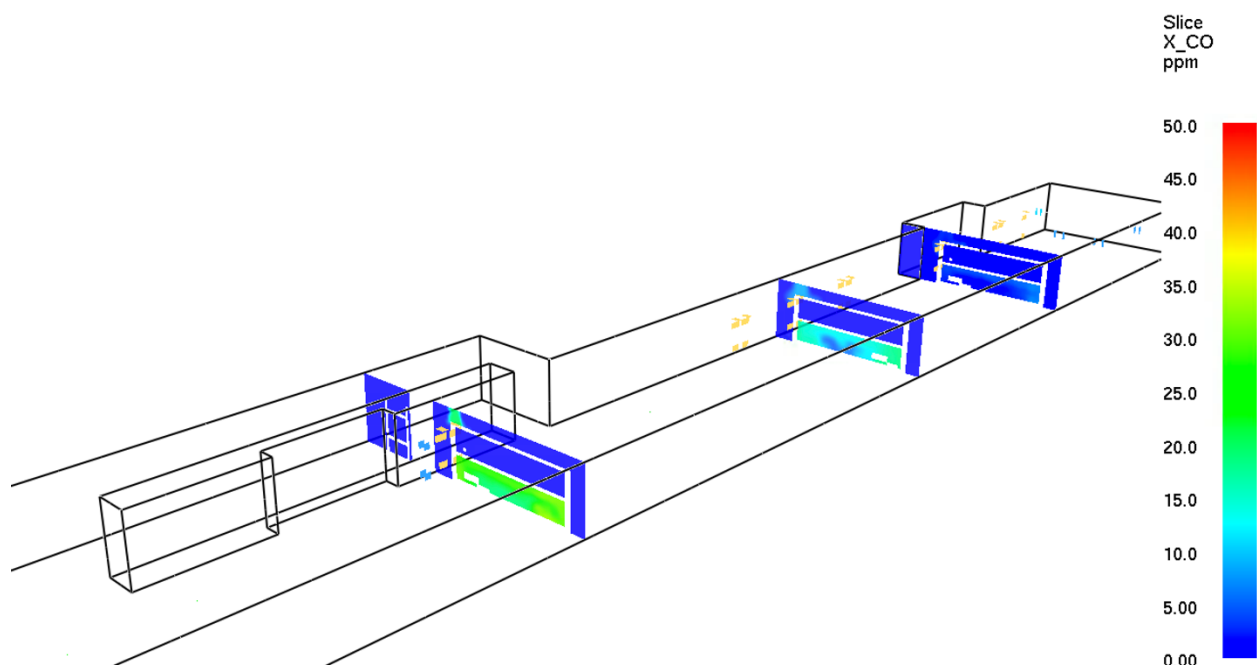


Figura 98 - Concentració de CO al soterrani PS-4 als plans transversals CT3, Ct4 i CT5, a l'instant en què s'atura la ventilació, t=340 s

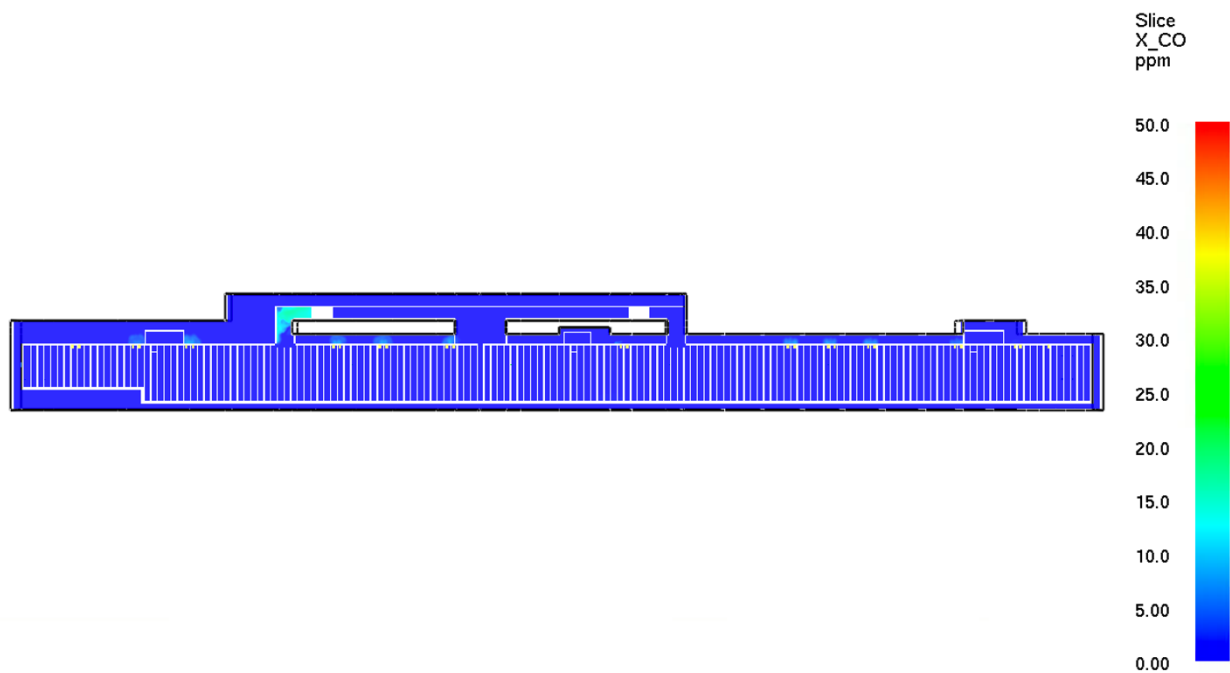


Figura 99 - Concentració de CO al soterrani PS-3 al pla z=5.2m, a l'instant que s'atura la ventilació, t=340 s.

Malgrat que a la rampa, en el moment d'activar la ventilació, la concentració de CO ha anat pujant, no arriba a afectar el soterrani PS-3, que es manté lliure de CO tal com s'havia definit inicialment.

Es fa evident en la simulació que la ventilació té un efecte de barreja que permet baixar ràpidament la concentració de la zona de 50 ppm, però en el cas plantejat en què la resta de l'aparcament es troba en valors propers als 20 ppm, els 5 minuts durant els quals funciona la ventilació no permeten netejar completament de CO el soterrani PS-4.

7 Conclusions

El disseny elaborat per a fer la simulació ha permès reproduir correctament la ventilació de l'aparcament utilitzant malles de 20 cm en les zones més crítiques (posicions de la ventilació d'impulsió i zona d'incendi) utilitzant un total de 2.341.458 cel·les. Això ha representat un temps de simulació de 192,8 hores (8 dies) en l'escenari A (incendi) i de 39 hores (1,6 dies) en l'escenari B (salubritat).

S'ha observat que en l'escenari d'incendi (escenari A) el fum omple al llarg dels primers 15 minuts tota l'ala mar del soterrani PS-4 fins a la rampa. A partir d'aquí comença a ascendir per la rampa arribant al soterrani PS-3 al cap de 30 minuts aproximadament. No arriba a ocupar mai l'ala muntanya del soterrani on hi ha l'incendi. En termes de visibilitat aquesta no està garantida durant els 10 primers minuts que dura l'evacuació a l'ala mar del soterrani. Posteriorment la visibilitat encara empitjora essent inferior als 5 m en més de la meitat del soterrani PS-4. La visibilitat no es recupera en tot l'aparcament fins al cap d'1 hora de l'inici de l'incendi. Pel què fa a la temperatura, aquesta no suposa un problema durant els 10 primers minuts, en què el valor llindar de 60 °C només es supera en les proximitats de l'incendi. El mateix succeeix amb la concentració d'oxigen que només baixa a concentracions perilloses en la zona propera a l'incendi durant els 10 primers minuts. Pel què fa a la concentració de CO, no es pot dir que es garanteixi una concentració per sota dels 150 ppm durant els 10 primers minuts, tot i que sí durant els primers 5 minuts i no s'assoleix una situació en què cap punt de l'aparcament estigui per sobre dels 150 ppm fins aproximadament 43 minuts després de l'incendi. Finalment, pel què fa a la concentració de CO, no suposa un perill en cap moment.

En l'escenari de salubritat el sistema es mostra eficaç per fer baixar la concentració per sota dels 50 ppm, però no permet reduir la concentració significativament per sota dels 20 ppm, essent aquesta la concentració basal que s'havia fixat. En aquest cas potser caldria tenir activats els ventiladors durant més temps.

8 Bibliografia

Bombers de la Generalitat de Catalunya. *Guia tècnica de disseny prestacional (PBD). Sistemes de control de fums i calor per impulsos*. GTC.SP.001 V.2, 2017.

BRE, Martin M., Fire Spread in Car Parks, Final Research Report BD 2552, 2010.

Chaloulakou, A., Duci, A., Spyrellis, N. Exposure to carbon monoxide in enclosed multi-level parking garages in the central Athens urban area. *Indoor and Built Environment*, 11 (4) 191-201, 2002.

McGrattan K., Hostikka S., McDermott., Floyd J., Weinschenk C., and Overholt K., "Fire Dynamics Simulator, User's Guide, Sixth Edition," *NIST Spec. Publ. 1019*, 2013.

Ministry of Business, Innovation & Employment of New Zealand. *C/VM2-Verification Method: Framework for Fire Safety Design*. New Zealand Building Code Clauses C1-C6 Protection from Fire. (from www.dbh.govt.nz/compliance-documents), 2013